

# **TECHNICKÁ UNIVERSITA V LIBERCI**

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: Aplikované vědy a informatika

Studijní obor: Modelování a informatika

**Modelování nesaturovaného proudění na rozhraní bentonitu a žuly v  
hlubinném úložišti**

**Modelling of unsaturated flow between the bentonite and granite in a  
deep repository**

**Bakalářská práce**

Autor: Tomáš Straka

Vedoucí práce: doc.Ing.Milan Hokr, Ph.D.

Konzultant: Ing. Aleš Balvín

V Liberci 18. 5. 2012

# ZADÁNÍ

## ANOTACE

Práce je založena na benchmarkové úloze podle mezinárodního projektu Task Force EBS, která slouží k lepšímu pochopení hydrogeologických procesů probíhajících na rozhraní bentonitu, žuly a pukliny. Předmětem našeho výzkumu byl průběh saturace v prostoru a čase ve válcovém bentonitovém vzorku a jeho okolí, které tvoří hornina a puklina. Proudění v nenasatované zóně je popsáno pomocí nelineární Richardsovy rovnice.

Za tímto účelem jsme vytvořili sadu axi-symetrických 2D modelů s různou konfigurací parametrů užitých materiálů. K modelování byl využit program FEFLOW 6.0, založený na metodě konečných prvků.

Ve všech simulovaných případech jsme v poměrně krátkém čase zaznamenali částečnou desaturaci horniny v blízkém okolí vzorku bentonitu. V téměř všech případech se vzorek bentonitu následně plně satureoval. Jedinou výjimkou byl případ neobsahující puklinu s hydraulickou vodivostí horniny velmi blízkou hydraulické vodivosti bentonitu.

V jednom ze zmíněných případů byla zadána retenční křivka bentonitu nestandardním vztahem, který není ve FEFLOW implementován. Abychom docílili co nejlepší shody některého z modelů retenčních křivek užitých ve FEFLOW se zmíněným vztahem, optimalizovali jsme jejich parametry v programu Matlab.

### **Klíčová slova**

**nesaturované proudění, Richardsova rovnice, modelování, retenční křivka, bentonit**

## ABSTRACT

This work is based on the benchmark problem, which is part of international project Task Force EBS and it is intended to provide better understanding of the hydrogeologic processes at the interface of bentonite, granite and fracture. We investigated time changes of saturation in a cylindrical bentonite sample and the surrounding area, which consists of rock and fracture.

Unsaturated flow is described by the nonlinear Richards equation. For this purpose, we developed a set of axi-symmetric 2D models with different configuration of material parameters. We used program FEFLOW 6.0, which is based on the finite element method, for modelling.

In all simulated cases, we noticed the partial desaturation of rock near the bentonite sample after short time. In almost all cases, the sample of bentonite has been later fully saturated. The only exception was the case with no fracture and with rock hydraulic conductivity very close to the hydraulic conductivity of bentonite

In one case, the retention curve of bentonite was given by uncommon relationship, not implemented in FEFLOW. To achieve the best correspondence for any of the retention curve used in FEFLOW with the mentioned relationship, we optimized their parameters in Matlab.

### **Keywords**

**unsaturated flow, Richards equation, modelling, retention curve, bentonite**

## Prohlášení

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

Beru na vědomí, že Technická universita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiju-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

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

Datum:

Podpis:

## OBSAH

Zadání	2
Anotace	3
Abstract	3
Obsah	5
1	Úvod.....6
1.1	Typografické konvence.....7
2	Proudění v nesaturovaném nebo proměnlivě saturovaném prostředí.....8
2.1	Základní pojmy pro popis transportních jevů v porézním prostředí:.....8
2.2	modely retenčních křivek.....9
2.3	Popis stlačitelnosti vody a materiálu ..... 11
2.4	Formulace bilancí hmoty a odvození rovnic proudění..... 12
2.4.1	Okrajové a počáteční podmínky Rovnic proudění ..... 13
3	Materiálové a geometrické vlastnosti modelů..... 14
3.1	Geometrie úlohy ..... 14
3.2	Okrajové a počáteční podmínky..... 15
3.3	Popis a přepočítání údajů základního případu ..... 16
3.3.1	materiálové parametry základního modelu ..... 16
3.3.2	Přepočítání transmisivity a storativity..... 16
3.3.3	Přepočítání van Genuchtenových koeficientů z tvaru užívaného v [1]..... 16
3.4	Zadání pro vyhodnocení vlivu parametrů v odvozených případech ..... 17
3.4.1	Vliv hydraulické vodivosti pukliny a horniny ..... 17
3.4.2	Vliv hydraulické vodivosti bentonitu..... 18
3.4.3	Vliv retenční křivky bentonitu..... 18
3.4.4	Vliv retenční křivky pukliny a horniny ..... 21
3.4.5	Vliv porozity horniny a pukliny ..... 22
4	modely pro otestování softwaru a užitých materiálů..... 23
4.1	Ustálená úloha ..... 23
4.2	Rozsah kapilární třásně..... 24
4.3	Ustálení saturace mezi materiály s různou retenční křivkou ..... 26
4.4	Zjednodušený osově symetrický model..... 27
4.5	Přiložené testovací modely ..... 29
5	Popis modelů vytvořených podle benchmarku task 8 ..... 30
5.1	Popis simulace základního případu ..... 31
5.2	Modelování odvozených případů ..... 33
5.3	Vyhodnocení spočtených modelů..... 35
5.3.1	Průběh saturace v jednotlivých případech..... 36
5.3.2	Desaturace materiálu v okolí rozhraní horniny a bentonitu ..... 37
6	Závěr..... 40
7	Dodatky ..... 41
7.1	Použitá literatura: ..... 41
	Seznam obrázků..... 42
	Seznam tabulek..... 42
	Seznam termínů a zkratk..... <b>Error! Bookmark not defined.</b>

# 1 ÚVOD

Tato práce je založena na benchmarkové úloze, která spadá pod mezinárodní projekt Task Force EBS (dále jen EBS), kterého se účastní také technická univerzita v Liberci (dále TUL). Projekt je koordinován organizací Svensk Kärnbränslehantering AB (švédská správa jaderného paliva a odpadu). Projekt EBS je zaměřen na numerické modelování termo-hydro-mechanických procesů v inženýrských bariérách v prostředí hlubinných úložišť. Označení benchmarku, ze kterého vycházíme je EBS task 8, a jeho popis je v dokumentaci [1]. Tento benchmark, nebo-li zátěžový test, na jehož zpracování se podílí několik pracovišť po celém světě, slouží k lepšímu pochopení hydrogeologických procesů probíhajících na rozhraní bentonitu, žuly a pukliny a očekává se, že jeho výsledky by mohly být využity při simulaci jevů v plánovaných případech hlubinných úložišť.

Bentonit je speciální druh jílu, je hygroskopický, má vysokou nasákavost, nízkou hydraulickou vodivost a vlivem nasákání vodou jeho částice bobtnají. Součástí projektu EBS je vyhodnocení vlastností bentonitu pomocí numerických simulací. Díky svým vlastnostem je plánováno užití bentonitu jako ochranné obalové vrstvy kolem kontejnerů s radioaktivním odpadem. Bentonit by měl sloužit jako izolant vlhkosti, která by postupem času mohla narušit celistvost kontejneru s vyhořelým jaderným materiálem, měl by také bránit úniku radiace, nadměrnému šíření tepla z kontejnerů a chránit kontejner proti mechanickému poškození.

V dokumentaci [1] je kladen důraz na osově symetrické 2D modely. Naším cílem bylo vytvořit sadu 22 modelů požadovaných v [1], s různými materiálovými vlastnostmi. Tato sada modelů by měla sloužit k vyhodnocení vlivu parametrů materiálu na průběh saturace v prostoru a čase.

K modelování jsme využili simulační software FEFLOW 6.0, dále jen FEFLOW. Jedná se o komerční simulační software, který k modelování proudění využívá metodu konečných prvků, tato metoda je podrobně popsána např. v knize [4]. V současné době je v oblasti modelování a simulace k dispozici poměrně velké množství softwaru, jedním z nich je FEFLOW. Jedná se o komerční software pro řešení rovnic popisujících tok tekutiny v porézním prostředí a následně transport nějaké látky případně tepla v této tekutině. Umožňuje modelování těchto jevů, jak v saturovaném, tak nesaturovaném prostředí. Tento software byl prvně představen v roce 1979, Dr. Hans-Jörgem G. Dierschem. Ten vyvíjel tento program na Institutu mechaniky, pod akademii věd v Berlíně do roku 1990. V roce 1990 se Diersch stal jedním ze zakladatelů firmy WASY GmbH, která Feflow dále vyvíjela a rozšiřovala v komerční balíček simulačního software. V roce 2007 byly jejich akcie odkoupeny skupinou DHI. Od té doby se firma jmenuje DHI-WASY GmbH a Feflow se stal softwarovým vlastnictvím skupiny DHI. Feflow během vývoje prošel řadou změn, jednou z nejnovějších je přepracování uživatelského rozhraní na rozhraní bližší uživateli

MS Windows, označovaném jako Feflow 6.0. Potřebné informace k práci s programem jsou obsaženy v manuálu [3]. Několik manuálů je k dispozici na stránkách programu FEFLOW, odkaz [5], pod záložkou Documentation. Demoverze omezuje modelování ve Feflow pouze na oblasti dělené na síť o méně než 500 prvcích. Licence TUL, kterou jsme k této práci využili je omezena na 5000 prvků.

Tématem této práce se z části zabývá publikace [6].

Práce byla řešena s využitím účelové podpory v rámci projektu MPO Výzkum vlastností materiálu pro bezpečné ukládání radioaktivních odpadů a vývoj postupu jejich hodnocení ev. č. FR-TI1/362v programu TIP.

## 1.1 TYPOGRAFICKÉ KONVENCE

V textu jsou použity různé styly textu a formátování, které pomáhají rozlišit odlišné typy informací:

- Pro obyčejný text je použito běžné proporcionální patkové písmo.
- ***Tučným písmem*** jsou značeny vektorové a tenzorové veličiny
- *Kurzívou* jsou značeny citace a skalární veličiny vystupující ve vzorcích

## 2 PROUDĚNÍ V NESATUROVANÉM NEBO PROMĚNLIVĚ SATUROVANÉM PROSTŘEDÍ

### 2.1 ZÁKLADNÍ POJMY PRO POPIS TRANSPORTNÍCH JEVŮ V PORÉZNÍM PROSTŘEDÍ:

V této části se budeme věnovat popisu základních pojmů problematiky proudění v nenasyčené zóně, užitých v této práci.

Prvním z těchto pojmů je reprezentativní elementární objem (*REV*), to je objem dostatečně velký na to, aby pokryl mikroskopickou nehomogenitu (tj. rozměr řádově větší než je charakteristický rozměr zrn pevné látky) a zároveň dostatečně malý vzhledem k rozměru zkoumané oblasti. Podle [II], str.53. *definice REV nemusí být vždy jednoznačná, např. v případě víceúrovňové mikroskopické struktury či různého typu makroskopických heterogenit.*

Obecně je každá veličina (koncentrace, tlak, rychlost ) v určitém bodě prostoru definována vztahem typu

$$\alpha = \frac{1}{V} \cdot \int \alpha_{mic} dV , \quad (2.1)$$

kde  $V$  je objem *REV* se středem v uvažovaném bodě,  $\alpha_{mic}$  je hodnota příslušné veličiny na mikroskopické úrovni a  $\alpha$  je hodnota vystřed'ované veličiny

První z popisných veličin je porozita materiálu zavedená vztahem

$$n = \frac{V_i}{REV} \quad (2.2)$$

Kde  $V_i$  je objem pórů v *REV*.

$$H = z + \frac{p}{\rho g} \quad (2.3)$$

je tzv. piezometrická výška.  $p$  v tomto vzorci značí tlak kapaliny,  $\rho$  představuje hustotu a  $g$  značí velikost gravitačního zrychlení. Piezometrická výška má v nesaturované zóně zápornou hodnotu a představuje kapilární sání. Dále zavádíme veličinu, zvanou tlaková výška (značíme  $h$ ) a jde v podstatě o tlak vyjádřený v délkových jednotkách (tlak jako výška vodního sloupce).

$$h = \frac{p}{\rho g} . \quad (2.4)$$

Pohybovou rovnicí, která určuje závislost pohybu kapaliny na silovém působení, je v případě proudění v porézním prostředí Darcyho-Buckinghamův zákon, zobecnění Darcyho zákona pro vektorové veličiny ve 3D. Zde jen, že se zavádí veličina zvaná Darcyovská rychlost, která v podstatě vyjadřuje plošnou hustotu objemového toku  $Q$ . Darcyovská rychlost se značí  $q$ .

$$q = Q/S \quad (2.5)$$



Další veličinou je tzv. průměrná rychlost vody v pórech, jedná se o veličinu popisující pohyb částic vody. a je definována pomocí následujícího vztahu

$$\mathbf{v} = \mathbf{q} / n \quad (2.6)$$

Darcyho-Buckinghamův zákon má tvar:

$$\mathbf{q} = -\mathbf{K}(s(H)) \cdot \mathbf{grad}(H) = -\mathbf{K}(s) \cdot \mathbf{grad}(h + z) = -\mathbf{K}(s) \cdot (\mathbf{grad}(h) + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix}) \quad (2.7)$$

kde  $\mathbf{K}$  je tenzor hydraulické vodivosti. Hydraulická vodivost je vzhledem k obecně anisotropnímu prostředí tenzor 2. řádu, jehož složky, pokud je prostředí nehomogenní, navíc závisí na prostorových souřadnicích. Tento tenzor je symetrický podle hlavní diagonály, tzn. že  $K_{ji} = K_{ij}$ , kde  $j, i$  jsou postupně rovně označení souřadnic  $x, y, z$ .

Zavádí se též takzvaná propustnost (permeabilita)  $\mathbf{k}$  (s rozměrem metr), která již závisí jen na porézním materiálu a platí:

$$\mathbf{K} = \frac{\mathbf{k} \rho g}{\mu}, \quad (2.8)$$

kde  $\rho$  je hustota a  $\mu$  je dynamická viskozita kapaliny.

Hydraulická vodivost je v nesaturované zóně určena relativní hydraulickou vodivostí pomocí vztahu

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_s \cdot K_r(s) \quad (2.9)$$

kde  $\mathbf{K}_s$  je hydraulická vodivost saturovaného materiálu a  $K_r(s)$  je závislost relativní hydraulické vodivosti na saturaci materiálu. Relativní hydraulické vodivosti závisí na užití retenční křivce (křivka, která určuje kapilární nasákavost porézního materiálu). Hydraulická vodivost má tedy v nesaturované zóně obecně podobu

$$\mathbf{K} = \begin{matrix} \mathbf{K}_{xx} & \mathbf{K}_{xy} & \mathbf{K}_{xz} \\ \mathbf{K}_{yx} & \mathbf{K}_{yy} & \mathbf{K}_{yz} \cdot K_r(s) \\ \mathbf{K}_{zx} & \mathbf{K}_{zy} & \mathbf{K}_{zz} \end{matrix} \quad (2.10)$$

## 2.2 MODEL Y RETENČNÍCH KŘIVEK

Retenční křivka definuje závislost saturace porézního materiálu na kapilární tlakové výšce vody v nesaturované zóně. Pro popis těchto křivek bylo odvozeno několik vztahů. Parametry těchto křivek jsou v praxi optimalizovány na měřené hodnoty materiálu. Nejčastějšími aproximačními křivkami jsou parametrické modely van Genuchtenův a model Brooks-Corey. Následuje popis jednotlivých modelů retenčních křivek, které používá program FEFLOW. Těmi jsou van Genuchtenův model

$$s = \left( \frac{1}{1 + |\alpha \cdot h|^n} \right)^m \quad \text{pro } h < 0, \text{ a } s = 1 \text{ pro } 0 \leq h \quad (2.11)$$

Pro relativní vodivost se v tomto modelu většinou užívá vztahu

$$K_r = s^{1/2} [1 - (1 - s^{1/m})^m]^2 \quad \text{pro } h < 0, \text{ a } K_r = 1 \text{ pro } 0 \leq h \quad (2.12)$$

kde parametr  $m$  je zpravidla vázán vztahem  $1 - \frac{1}{n}$ . (2.13)

Brooks-Corey model

$$s = \left( \frac{1}{|\alpha \cdot h|^n} \right) \quad \text{pro } h < \left( -\frac{1}{\alpha} \right), \text{ a } s = 1 \text{ pro } 0 \leq h \quad (2.14)$$

$$K_r = s^{b+a/\lambda} \quad \text{pro } h < 0, \text{ a } s = 1 \text{ pro } h > \left( -\frac{1}{\alpha} \right) \quad (2.15)$$

Takto definovaná hydraulická vodivost je použitelná jak pro van Genuchtenův vztah (s koeficienty  $a = 2, b = 2,5$ ) tak pro zákon Brookse-Coreyho ( $a = 2, b = 3$ ).

Haverkampův model

$$s = \left( \frac{\alpha}{\alpha + |h|^n} \right) \quad \text{pro } h < 0, \text{ a } s = 1 \text{ pro } 0 \leq h \quad (2.16)$$

$$s = \left( \frac{A}{A + |h|^B} \right) \quad \text{pro } h < 0, \text{ a } s = 1 \text{ pro } 0 \leq h \quad (2.17)$$

Exponenciální vztah

$$s = e^{\alpha(h)} \quad \text{pro } h < 0 \text{ a } s = 1 \text{ pro } 0 \leq h \quad (2.18)$$

Modifikovaný van Genuchtenův vztah

$$s = \left( \frac{s_s - s_r}{(1 + |\alpha \cdot h|^n)^m} \right) + s_r \quad \text{pro } h < 0 \text{ a } s = 1 \text{ pro } 0 \leq h \quad (2.19)$$

$$K_r = s_e^{1/2} \left( \frac{1 - F(s)}{1 - F(s_s)} \right)^2 \quad (2.20)$$

$$F(s) = \left[ 1 - \left( \frac{s - s_r}{s_s - s_r} \right)^{1/m} \right]^m \quad (2.21)$$

$s_s$  je maximální saturace,  $s_r$  je tzv. reziduální saturace, tzn. vlhkost, která se neúčastní proudění, a  $s_e$  je efektivní saturace ( $s_e = s_s - s_r$ ).

Pro popis relativních vodivostí se používají i další vztahy. V Programu FEFLOW 6.0 je relativní vodivost určena výběrem parametrického modelu retenční křivky. Podrobněji jsou retenční křivky popsány v kapitole 13, v knize [2].

## 2.3 POPIS STLAČITELNOSTI VODY A MATERIÁLU

Specifická storativita vyjadřuje elementární objem vody  $dV_w$  uvolněný z objemu materiálu  $V_m$  při elementární změně poklesu tlakové výšky  $dh$ .

$$S_s = \frac{1}{V_m} \cdot \frac{dV_w}{dh} = \frac{1}{V_m} \cdot \frac{dV_w}{dp} = \frac{1}{V_m} \cdot \frac{dV_w}{dp} \cdot \frac{dp}{dh} = \frac{1}{V_m} \cdot \frac{dV_w}{dp} \cdot \gamma_w \quad (2.22)$$

V této rovnosti  $dp$  značí elementární změnu tlaku a  $\gamma_w$  značí tzv. specifickou tíži vody.

$$\gamma_w = \rho \cdot g \quad (2.23)$$

Specifickou storativitu materiálu lze také udávat v hmotnostní podobě, tedy jako elementární hmotnost vody  $dm_w$  uvolněnou z části materiálu o hmotnosti  $m_m$  při elementárním poklesu tlakové výšky.

$$S_s = \frac{1}{m_m} \cdot \frac{dm_w}{dh} \quad (2.24)$$

Závislost specifické storativity na stlačitelnosti materiálu  $\beta_p$  a vody  $\beta_w$  popisuje rovnost

$$S_s = \gamma_w \cdot (\beta_p + n \cdot \beta_w) \quad (2.25)$$

$$\beta_p = \frac{dV}{d\sigma_e} \cdot \frac{1}{V} \quad (2.26)$$

$$\beta_w = \frac{dV_w}{dp} \cdot \frac{1}{V_w} \quad (2.27)$$

Kde  $\sigma_m$  je tzv. efektivní napětí materiálu a platí

$$\sigma_m = \sigma - u \quad (2.28)$$

Kde  $\sigma$ ,  $u$  je tlak v materiálu a  $u$  je tlak vody. V jednoduchých případech, kdy lze porézní prostředí považovat za homogenní a izotropní, lze  $\sigma$  a  $u$  vyjádřit jako

$$\sigma = H_{soil} \cdot \gamma_{soil} \quad (2.29)$$

$$u = H_w \cdot \gamma_w \quad (2.31)$$

Veličina zvaná storativita je vyjádřena jako elementární změna objemu vody  $dV_w$  uvolněného při elementární změně poklesu tlakové výšky  $dh$ , vztažená na jednotku plochy  $A$ .

$$S = \frac{1}{A} \cdot \frac{dV_w}{dh} \quad (2.32)$$

Nebo-li

$$S = S_s \cdot b \quad (2.33)$$

Kde  $b$  je vertikální šířka vrstvy nad plochou  $A$ , ze které se objem vody uvolní.

## 2.4 FORMULACE BILANCÍ HMOTY A ODVOZENÍ ROVNIC PROUDĚNÍ

Proudění je v porézním prostředí popsáno dvěma diferenciálními rovnicemi, pohybovou rovnicí je výše popsáný Darcyho-Buckinghamův zákon, rovnice(2.6). 2.rovnicí popisující proudění kapaliny v porézním prostředí je rovnice bilance hmoty(2.34)

$$\int \frac{\partial(\rho n)}{\partial t} dV = \int P \rho dV - \int \rho \mathbf{q} d\mathbf{S}. \quad (2.34)$$

$P$  v této rovnici popisuje hustotu zdrojů, či propadů jako objem kapaliny vtlačeny do jednotkového objemu porézního materiálu během jednotkového času [ $\text{m}^3/\text{m}^3/\text{s}$ ],jedná se o tzv. specifickou vydatnost zdroje. Tato bilance musí platit pro každou fázi, tedy složku s jednotnou mikroskopickou strukturou a stejnými fyzikálně chemickými vlastnostmi. Tato bilance platí pro každou z fází i v případech kdy je fází přítomno více. U nenasyceného prostředí jsou přítomny fáze dvě, vzduch a voda. Předchozí bilanci můžeme pomocí Gaussovy-Ostrogradského věty upravit na rovnici.

$$\frac{\partial(\rho n)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{q}) = P \rho \quad (2.35)$$

Při konstantní hustotě a porozitě tato rovnice přechází v rovnici:

$$\text{div}(\mathbf{v}) = \frac{P}{n} \quad (2.36)$$

Darcyho zákon a rovnici kontinuity můžeme ponechat jako systém dvou rovnic. Případně můžeme tuto soustavu dosazením upravit na jednu rovnici

$$\nabla(\mathbf{K} \cdot \nabla \mathbf{q}) = P \quad (2.37)$$

Při popisu proudění v nenasycené zóně přistupuje k bilanci(3.30) člen  $s$ , saturace. Tedy objem látky (v tomto případě vody) v daném objemu porézní matrice. Bilance má pak tvar

$$\int \frac{\partial(\rho s)}{\partial t} dV = \int P \rho dV - \int \rho \mathbf{v} s d\mathbf{S} \quad (2.38)$$

Rovnici opět upravíme pomocí Gauss-Ostrogradského věty na

$$\frac{\partial s \rho}{\partial t} + \text{div}(s \rho \mathbf{v}) = P \quad (2.39)$$

Pokud vynecháme v rovnici zdroje tak, pro nestlačitelnou kapalinu, nemění se hustota získáme

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{q}) = 0 \quad (2.40)$$

Neboť platí

$$\mathbf{q} = s \cdot \mathbf{v} \quad (2.41)$$

Dosazením Darcyho zákona do rovnice kontinuity získáme Richardsovu rovnici

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \text{div}(\mathbf{K} \cdot \mathbf{grad}(h) + \mathbf{K} * 3), \quad (2.42)$$

Tu můžeme formulovat také např. takto

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \text{div}(\mathbf{K} \cdot \mathbf{grad}(h) + \mathbf{K} * 3) \quad (2.43)$$

Kde  $C(h)$  je tzv. specifická kapacita, což je derivace retenční křivky podle  $h$ . Richardsova rovnice je nelineární parciální diferenciální rovnice II. řádu a platí za následujících podmínek.

1. pokud se porézní prostředí blíží kapilárnímu modelu prostředí. Je nehybné a nedochází v něm k jeho deformacím .
2. tlak vzduchu v pórech se nemění a má hodnotu atmosferického tlaku.
3. voda proudící v tomto prostředí je nestlačitelná

#### 2.4.1 OKRAJOVÉ A POČÁTEČNÍ PODMÍNKY ROVNIC PROUDĚNÍ

Užíváme standartní značení, kdy  $\Omega$  značí oblast v  $R_3$ , ve které úlohu řešíme (definiční obor neznámých funkcí  $v, H_d, s$ ) a  $\Gamma = \partial\Omega$  její hranici.

Dirichletova podmínka udává hodnotu piezometrické výšky  $H_d$  na části hranice  $\Gamma_1$ .

$$H_d = f(x) \quad (2.44)$$

Neumannova podmínka udává průtok na části hranice  $\Gamma_2$ .

$$\mathbf{q} \cdot \mathbf{v} = f(x) \quad (2.45)$$

kde  $\mathbf{v}$  je jednotkový vektor vnější normály k hranici oblasti. Tato podmínka se nejčastěji uplatňuje pro případ, kdy je hranice nepropustná, jedná se tedy o homogenní podmínku

$$\mathbf{q} \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (2.46)$$

Newtonova-Cauchyova podmínka se používá v případě, kdy je část hranice tvořena polopropustnou vrstvou. Velikost průtoku touto vrstvou je v tomto případě přímo úměrná rozdílu tlakových výšek na obou stranách polopropustné části hranice.

$$\mathbf{q} \cdot \mathbf{v} = \frac{H-H_0}{c} \quad (2.47)$$

Kde  $H$  je hydraulická výška uvnitř oblasti

$H_0$  je hydraulická výška vně oblasti

$C = B/K$  je odpor překážky vůči proudění

$B$  je šířka přepážky

$K$  je propustnost přepážky.

Při popisu neustáleného proudění, je třeba zadat též počáteční podmínky. Ty popisují proudění ve sledované oblasti na počátku řešení, tedy v čase  $t=0$ . Jde o zadání hydraulické výšky, případně saturace ve všech bodech sledované oblasti. Saturaci lze přepočítat na hydraulickou výšku pomocí retenční křivky. Okrajové podmínky se také mohou v případě neustáleného proudění měnit v závislosti na čase.

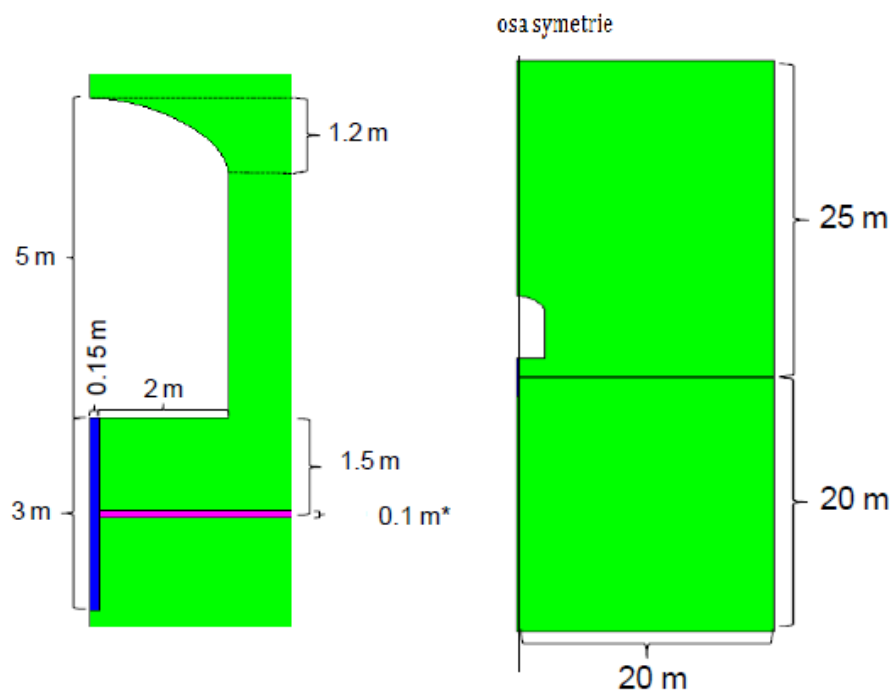
### 3 MATERIÁLOVÉ A GEOMETRICKÉ VLASTNOSTI MODELŮ

#### 3.1 GEOMETRIE ÚLOHY

Naším cílem bylo vytvořit na základě dokumentace [1] model nasákání bentonitového válce vodou skrze puklinu a horninu pro sadu 22 modelových případů. Bentonit by v reálném případě měl tvořit obalovou vrstvu kolem kontejneru s jaderným palivem. Bentonit je hygroskopický, tzn. že nasává vlhkost a bobtná, takže může docházet k jeho mechanické deformaci. Sdružená úloha zahrnující mechanickou deformaci bentonitu není předmětem této práce.

Úloha transientní saturace bentonitu na rozhraní horniny a přítoku vody puklinou, je značně citlivá jak na některé materiálové parametry, tak na geometrii úlohy, na typ použité sítě konečných prvků, na délku časového kroku a také na použitou numerickou metodu.

. Geometrické uspořádání axi-symetrických 2D modelů se skládá ze tří částí a je znázorněno na obrázku 3-1, v levé části obrázku je znázorněno blízké okolí rozhraní mezi oblastí vyplněnou bentonitem, puklinou a horninou, obrázek je přejatý z [1], ze strany 35. Modelem prochází osa symetrie, ta vede skrze 30 cm široký válcový vzorek bentonitu, vysoký 3 m, obklopený masivem horniny.

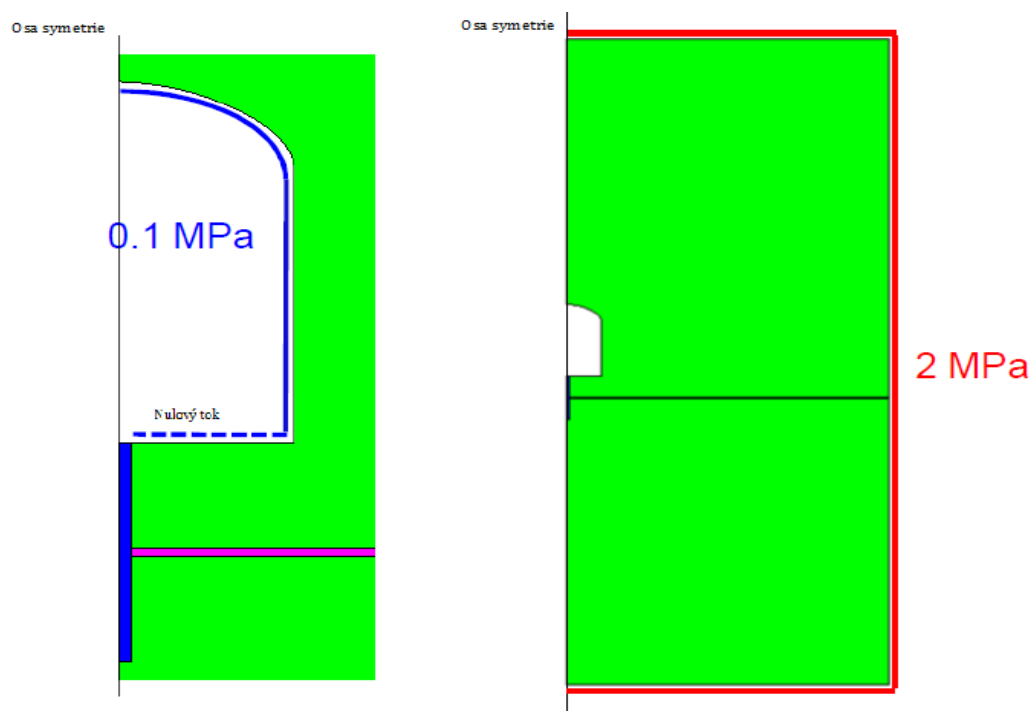


Obrázek 3-1 rozměry meridiánového řezu oblasti, přežato z [1] strana 35.

Vodorovně skrz horninu vede puklina k válci bentonitu. Nad bentonitovým válcem se v našich modelech nachází prázdná oblast představující prostor tunelu. Podle [1] můžeme v našich modelech reprezentovat puklinu tenkou vrstvou materiálu o daných vlastnostech.

Tloušťka této vrstvy by měla být přibližně 0,1 m. Právě tímto typem modelů se budeme v této práci zabývat. Další možností reprezentace pukliny je model, kde je puklina reprezentována diskretními prvky, ve FEFLOW označovanými jako "discrete features". Ty ve verzi FEFLOW 6.0 nejsou implementovány. Podle informací firmy DHI Wasy budou k dispozici v další verzi programu. Pro tento typ modelů bychom museli pracovat v původní verzi FEFLOW.

### 3.2 OKRAJOVÉ A POČÁTEČNÍ PODMÍNKY



Obrázek 3-2 okrajové podmínky modelů přejato z [1], str.36

Okrajové podmínky jsou zakresleny na obrázku 3-2. Na vnějším okraji válce představujícího modelovanou oblast jsme zvolili Dirichletovu podmínku v podobě piezometrické výšky o hodnotě 200m (to odpovídá tlaku 2MPa). Na zakřivené stěně výřezu, který představuje tunel, jsme zadali Dirichletovu okrajovou podmínku 10m (odpovídá tlaku 0,1 MPa). Na dně výřezu, volíme homogenní Neumannovu podmínku, tedy nulový tok skrze tuto stěnu. Jako počáteční podmínka byla volena pro bentonit saturace 0,36 (0.36 je očekávaná počáteční saturace dodaného bentonitu). Horninu a puklinu očekáváme plně saturovanou. Počáteční podmínky se do FEFLOW zadávají pomocí zadání hodnoty saturace v uzlech sítě. Zadání okrajových a počátečních podmínek je popsáno v [1] na straně 36. V [1] požadují simulaci na 100 let dopředu ve 22 případech modelových konfigurací různých parametrů. Všechny modely vycházejí z jednoho základního případu, jehož geometrie, okrajové a počáteční podmínky jsou popsány v předchozím textu. První situace, kterou jsme měli modelovat je v dokumentaci [1] označována jako „base case“, my budeme používat označení základní případ, nebo první případ. Od základního případu jsou pak odvozeny všechny ostatní situace popsané v [1].

### 3.3 POPIS A PŘEPOČET ÚDAJŮ ZÁKLADNÍHO PŘÍPADU

#### 3.3.1 MATERIÁLOVÉ PARAMETRY ZÁKLADNÍHO MODELU

Základní parametry případu 1 jsou popsány v tabulce 3-1. Ve druhém sloupci této tabulky je uvedena hydraulická vodivost  $K$ , ve třetím sloupci  $S_s$  značí specifickou storativitu a ve čtvrtém se nachází porozita materiálu. Puklinu budeme v našich modelech reprezentovat pomocí tenké vrstvy materiálu o daných vlastnostech. Porozitou pukliny, je myšlena porozita materiálu, který puklinu představuje. Vycházíme z dat uvedených v [1], na str. 36. FEFLOW můžeme při této konfiguraci modelu zadat pouze specifickou storativitu a hydraulickou vodivost. Hydraulickou vodivost a specifickou storativitu pukliny uvedenou v tabulce 3-1 bylo nejprve třeba vypočítat ze zadané transmisivity a storativity.

Tabulka 3-1 základní parametry užitých materiálů pro př.1

materiál	$K$ [m/s]	$S_s$ [m <sup>-1</sup> ]	porozita [-]
Bentonit	$6,4 \cdot 10^{-14}$	$10^{-11}$	0,438
hornina	$1 \cdot 10^{-12}$	$10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-5}$
puklina	$5 \cdot 10^{-5}$	$10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-3}$

#### 3.3.2 PŘEPOČET TRANSMISIVITY A STORATIVITY

V [1], str. 36 byla zadána storativita  $S_0 = 1 \cdot 10^{-9}$  a transmisivita  $T = 5 \cdot 10^{-10} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Dále je zadána šířka pukliny  $b = 1 \cdot 10^{-4}$  m pro diskrétní interpretaci pukliny. Hydraulickou vodivost a specifickou storativitu jsme ze zadaných dat vypočetli pomocí vzorců

$$K = \frac{T}{b} \quad (4.1)$$

$$S = \frac{S_0}{b} \quad (4.2)$$

Stejným způsobem jsme přepočítali zadané hodnoty transmisivity puklin v odvozených případech.

#### 3.3.3 PŘEPOČET VAN GENUCHTENOVÝCH KOEFICIENTŮ Z TVARU UŽÍVANÉHO V [1]

V [1] je užit van Genuchtenův zákon ve tvaru:

$$s = \left( 1 + \left( \frac{P_g - P_l}{P_0} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right)^{-\lambda} \quad (4.3)$$

kde  $P_g$  je tlak plynu, ten ve většině klademe roven atmosferickému,  $P_l$  je tlak kapaliny a  $P_0$  a  $\lambda$  jsou měřené parametry, tohoto vztahu.

FEFLOW užívá standartní tvar, ve formě závislosti saturace na kapilární tlakové výšce  $h$  vyjádřené pomocí vzorců (2.11 -2.21). Přepočet na retenční křivku (2.11) provádíme pomocí vzorců.



$$\alpha = \frac{\rho g}{P_0} \quad (4.4)$$

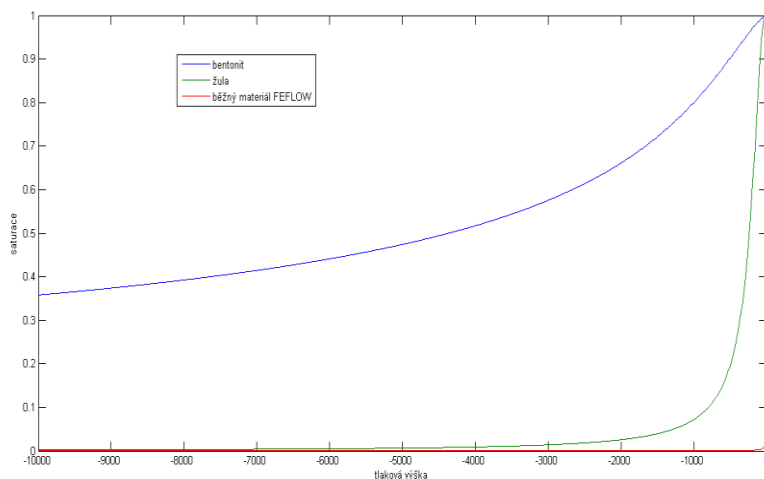
$$n = \frac{1}{1-\lambda} \quad (4.5)$$

Přepočtené koeficienty van Genuchtenova vztahu pro základní případ jsou uvedeny v tabulce 3-2

**Tabulka 3-2 parametry van Genuchtenova vztahu pro př.1**

BaseCase VG	alpha	n
Bentonit	$1,063 \cdot 10^{-3}$	1,429
hornina	$5,638 \cdot 10^{-3}$	2,5
puklina	$5,638 \cdot 10^{-3}$	2,5

Pro vykreslení retenčních křivek jsme použili program Matlab. Krátký skript sloužící k vykreslování je uveden v příloze 1. Na obrázku 3-3 jsou vykresleny retenční křivky užitých materiálů.



**Obrázek 3-3 retenční křivky použitých materiálů**

### 3.4 ZADÁNÍ PRO VYHODNOCENÍ VLIVU PARAMETRŮ V ODVOZENÝCH PŘÍPADECH

V odstavcích 3.4.1 -3.4.5 jsou postupně popsány parametry 21 odvozených případů a jejich parametry, které se liší od parametrů zmíněného základního případu. Všechny 22 modelů sloužilo k vyhodnocení vlivu jednotlivých parametrů na průběh saturace v bentonitovém vzorku a jeho okolí.

#### 3.4.1 VLIV HYDRAULICKÉ VODIVOSTI PUKLINY A HORNINY

Prvních 16 případů, testujících závislost saturace bentonitu na hydraulické vodivosti materiálu horniny a pukliny, je uvedeno v tabulce 3-3, značíme je zde př.1-př.16. V prvním sloupci této tabulky je uvedena hydraulická vodivost horniny s rozměrem  $[m \cdot s^{-1}]$ . Ve druhém sloupci této tabulky jsou uvedeny označení případů, ve kterých model neobsahuje žádnou puklinu. V následujících třech sloupcích jsou uvedeny případy modelů, s kombinací horniny

o hydraulické vodivosti uvedené v prvním sloupci a s transmissivitou pukliny [m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>] uvedenou v prvním řádku tabulky.

Tabulka 3-3 prvních 16 případů, (zp) značí základní případ

K horniny[m.s <sup>-1</sup> ]/T pukliny[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]	bez pukliny	1.10 <sup>-12</sup>	1.10 <sup>-10</sup>	1.10 <sup>-8</sup>
1.10 <sup>-14</sup>	př. 9	př.5	př.2	př.13
1.10 <sup>-13</sup>	př.10	př.6	př.3	př.14
1.10 <sup>-12</sup>	př.11	př.7	př.1 (zp)	př.15
1.10 <sup>-11</sup>	př.12	př.8	př.4	př.16

### 3.4.2 VLIV HYDRAULICKÉ VODIVOSTI BENTONITU

Případy 17 a 18 testovaly vliv hydraulické vodivosti bentonitu. Hydraulická vodivost bentonitu v základním případě byla volena 6,4·10<sup>-14</sup>m.s<sup>-1</sup>. V případě 17 bylo předmětem výzkumu snížení hydraulické vodivosti o přibližně 40% (na 3,8·10<sup>-14</sup> m.s<sup>-1</sup>) a v případě 18 zvýšení o přibližně 100% (na 1,3·10<sup>-13</sup> m.s<sup>-1</sup>).

### 3.4.3 VLIV RETENČNÍ KŘIVKY BENTONITU

Devatenáctým případem bylo vyhodnocení vlivu alternativní retenční křivky bentonitu, tato křivka je zadána vzorcem

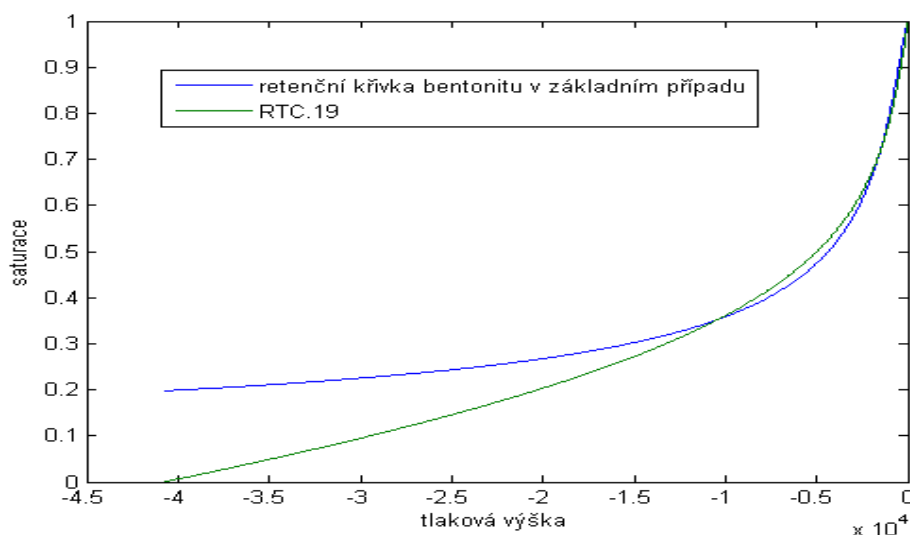
$$s = \left( 1 + \left( \frac{P_g - P_l}{P_0} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right)^{-\lambda} \cdot \left( 1 - \left( \frac{P_g - P_l}{P_1} \right) \right)^{\lambda_1} \quad (4.6)$$

$P_0 = 6.258$  MPa;  $\lambda = 0.21$ ;  $P_l = 400$  MPa;  $\lambda_l = 1$ . Tento případ je popsán v[1] na straně 40. Tuto křivku budeme dále označovat RTC.19. Křivka RTC.19 je vykreslena spolu s retenční křivkou bentonitu v základním případě na obrázku 3-4. Ve FEFLOW lze typ retenční křivky zadat pouze pomocí koeficientů pěti parametrických modelů, které máme k dispozici. Tyto modely jsou popsány ve druhé kapitole vztahy (2.11)-(2.21). Abychom se pomocí alespoň jednoho z dostupných modelů retenčních křivek co nejvíce přiblížili retenční křivce bentonitu požadované u případu 19, bylo třeba provést optimalizaci parametrů.

K optimalizaci jsme opět využili Matlab. V Matlabu jsme využili funkce lsqcurvefit(), která využívá Marquardt-Levenbergův algoritmus. Jejími argumenty jsou funkce, kterou chceme optimalizovat, předem známé vektory závislé a nezávislé veličiny, a počáteční odhad vektoru parametrů. Funkce lsqcurvefit() vrací několik parametrů. My jsme využívali návratové hodnoty vektoru optimalizovaných koeficientů a zbytek po optimalizaci „resnorm“, což je součet druhých mocnin odchylek ve známých bodech zadaných funkcí lsqcurvefit().

Volání funkce se v Matlabu užívá např. takto [x,resnorm]=lsqcurvefit(@Mojefun, x0,hod1,hod2). Kde @Mojefun je odkaz na námi definovanou funkci Mojefun(). Abychom parametry funkce Mojefun() mohli optimalizovat pomocí lsqcurvefit(), musí ležet v odděleném

souboru a první z jejích vstupních parametrů musí být vektor parametrů. Vektor  $x_0$  zde představuje počáteční odhad vektoru parametrů. Vektory  $hod1$  a  $hod2$  popořadě obsahují v době optimalizace známé vektory nezávislé a závislé veličiny.



**Obrázek 3-4 retenční křivka bentonitu v základním případě a křivka případu 19**

Zdrojový kód matlabovských souborů, které jsme pro optimalizaci využili nalezne čtenář v příloze 2. Zmíněné soubory jsou přiloženy na datovém CD v adresáři "Optimalizace\_matlab\_case\_19". Pro výpočet hodnot RTC.19 slouží funkce v souboru "RTC\_19.m". Pro výpočet retenčních křivek slouží nezávislé soubory: "RTC.m" pro van Genuchtenův vztah, "RTC\_Brooks\_Corey.m" pro zákon Brooks-Corey, "RTC\_Havkmp.m" Haverkampův vztah a "RTC\_Exponential.m" pro exponenciální retenční křivku. Pro optimalizaci většiny křivek a jejich vykreslení slouží soubory "RTC\_Kresli.m". Pro optimalizaci parametrů modifikovaného van Genuchtenova vztahu slouží soubor "RTC\_Kresli\_Mod\_VG.m", tento soubor využívá pro výpočet soubor "RTC\_modified\_VG.m". Při pokusech optimalizovat všechny čtyři parametry modifikovaného van Genuchtenova vztahu na křivku RTC19 nám vycházeli nefyzikální výsledky maximální saturace  $S_s$  a residuální saturace  $S_r$ . Maximální saturaci jsme tedy zkusili zadat přímo 1 a optimalizovat zbylé tři parametry. Dále jsme residuální saturaci zkusili přímo zvolit v námi vytvořeném souboru "RTC\_modified\_VG2.m, který už dokáže zpracovat funkce RTC\_Kresli(). Takto zadané hodnoty maximální a residuální saturace již optimalizační algoritmus neměnil.

V tabulce 3-4 jsou zaznamenány optimální parametry jednotlivých modelů retenčních křivek získané pomocí funkce `lsqcurvefit()`.

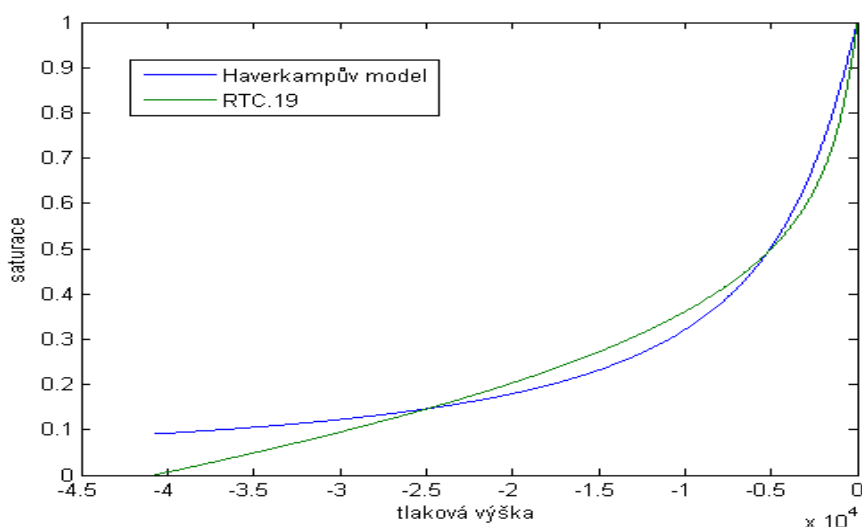
V prvním sloupci této tabulky je uveden název modelu retenční křivky, zkratky VG a modif. VG. zde značí van Genuchtenův a modifikovaný van Genuchtenův model. Ve druhém sloupci jsou uvedeny hodnoty parametru  $n$  užitého ve vztazích (2.11)-(2.21), ve třetím parametru  $\alpha$  (pro Haverkampův model není označen koeficient v tabulce příliš přesné), a ve

čtvrtém sloupci je uveden součet čtverců odchylek optimalizované křivky od křivky RTC.19 ve spočtených bodech, označovaný resnorm.

**Tabulka 3-4 parametry získané optimalizací na RTC.19**

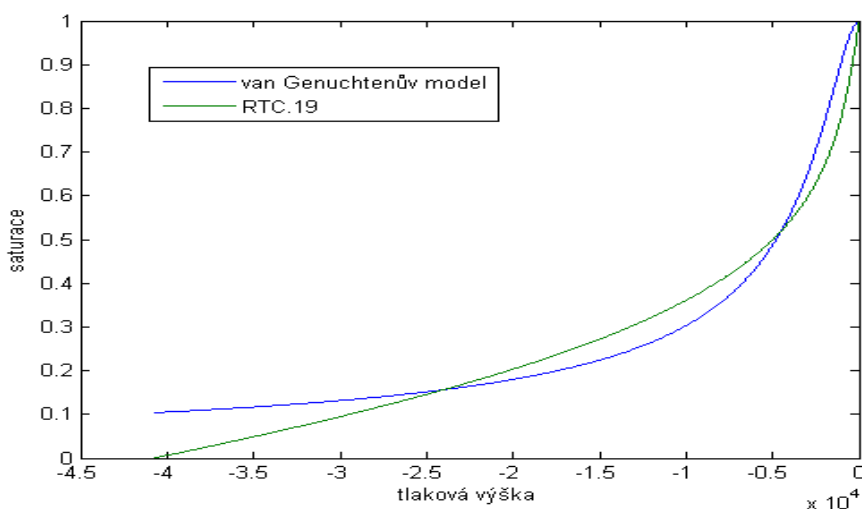
par. model	exponent	koeficient	resnorm
Haverkamp. m.	1	12440	1,808
VG	1,7803	0,0004	3,0126
modif. VG.	1,7803	0,0004	3,0126(Sr=0)
exponenciální m.	nezávisí	0,0001	3,9858
Brooks-Corey m.	0,6082	0,0008	5,0563

Nejlepší shody křivek jsme dosáhli pro Haverkampův vztah, křivka tohoto optimalizovaného vztahu společně s křivkou RTC.19 je vykreslena na obrázku 3-5.



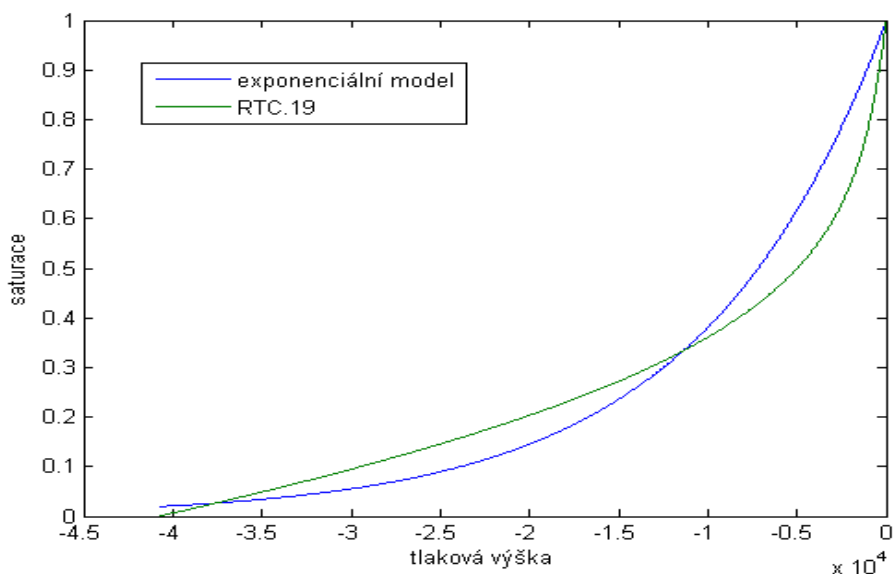
**Obrázek 3-5 retenční křivka optimalizovaného Haverkampova modelu a křivka případu 19**

Druhou nejlepší shodu křivek jsme našli u van Genuchtenova vztahu, optimální případ tohoto vztahu je vykreslen na obrázku 3-5.



**Obrázek 3-6 retenční křivka optimalizovaného van Genuchtenova vztahu a křivka případu 19**

Modifikovaný van Genuchtenův vztah byl křivce RTC.19 nejbliže v případě kdy jsme mu přímo zadali hodnotu residuální saturace nulovou, tedy v případě shody s van Genuchtenovým vztahem. Exponenciální model užitý ve FEFLOW závisí pouze na jednom parametru, ale získali jsme pro něj předposlední nejbližší shodu. Optimální exponenciální retenční křivka je vykreslena na obrázku 3-7. Nejslabší shodu s křivkou RTC.19 jsme při optimalizaci získali pro vztah Brooks-Corey. Při modelování případu 19 jsme využili retečních křivek, které se shodovali s křivkou RTC.19 nejvíce. Tedy Haverkampova, van Genuchtenova a exponenciálního vztahu.



Obrázek 3-7 retenční křivka optimalizovaného exponenciálního vztahu a křivka případu 19

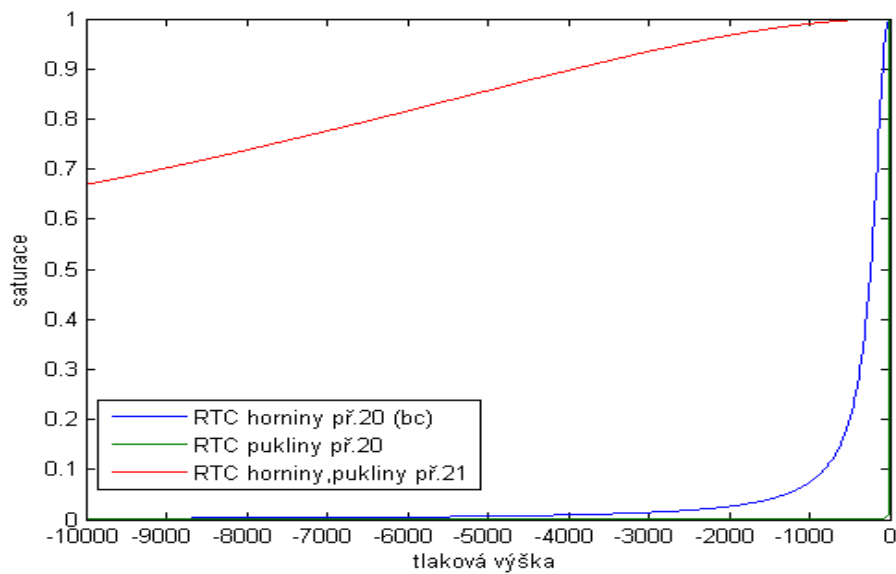
#### 3.4.4 VLIV RETENČNÍ KŘIVKY PUKLINY A HORNINY

Případy 20 a 21 pro vyhodnocení vlivu retenční křivky pukliny a horniny jsou uvedeny v tabulce 3-5. V prvním sloupci je uveden materiál, pro který jsme koeficienty měnily. V dalších dvou sloupcích jsou uvedeny parametry van Genuchtenova vztahu  $\alpha$  a  $n$ , ve čtvrtém sloupci je označení případu a bc značí shodu s retenční křivkou základního případu.

Tabulka 3-5 parametry van Genuchtenova vztahu pro př. 20 a př.21

VG	koeficient alpha	exponent n	případ	
hornina1	$5,638 \cdot 10^{-3}$	2,5	př.20	bc
puklina1	1,8	2,262		
hornina2	$1,22625 \cdot 10^{-4}$	1,818	př.21	
puklina2	$1,22625 \cdot 10^{-4}$	1,818		

Retenční křivky jsme si pro lepší orientaci opět vykreslili pomocí modulu popsáno v příloze 1. Křivky jsou vykresleny na obrázku 3-5. Zkratka (bc) v legendě u grafu retenční křivky horniny pro případ 20 opět značí shodu této křivky s retenční křivkou horniny a pukliny v základním případě.



**Obrázek 3-5 retenční křivky horniny a pukliny pro případy 20 a 21**

### 3.4.5 VLIV POROZITY HORNINY A PUKLINY

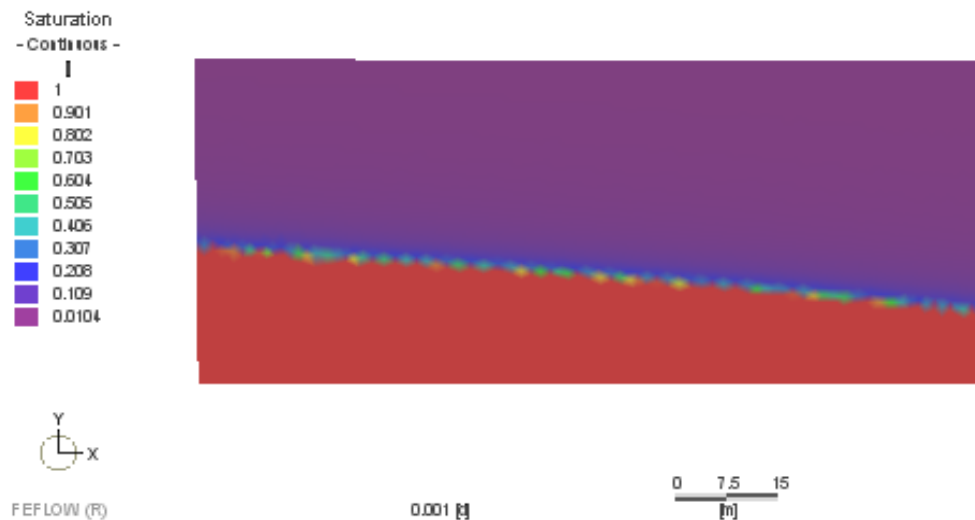
Závislost na porozitě popisuje případ22, porozita materiálu horniny i pukliny je v tomto případě volena 0,003.

## 4 MODELÝ PRO OTESTOVÁNÍ SOFTWARE A UŽITÝCH MATERIÁLŮ

Abychom otestovali program FEFLOW, zjistily vliv jednotlivých parametrů modelu na průběh simulace a otestovali konvergenci použitých numerických metod, vytvořili jsme několik jednodušších testovacích modelů, postupovali jsme od úloh, které jsme již dokázali nasimulovat.

### 4.1 USTÁLENÁ ÚLOHA

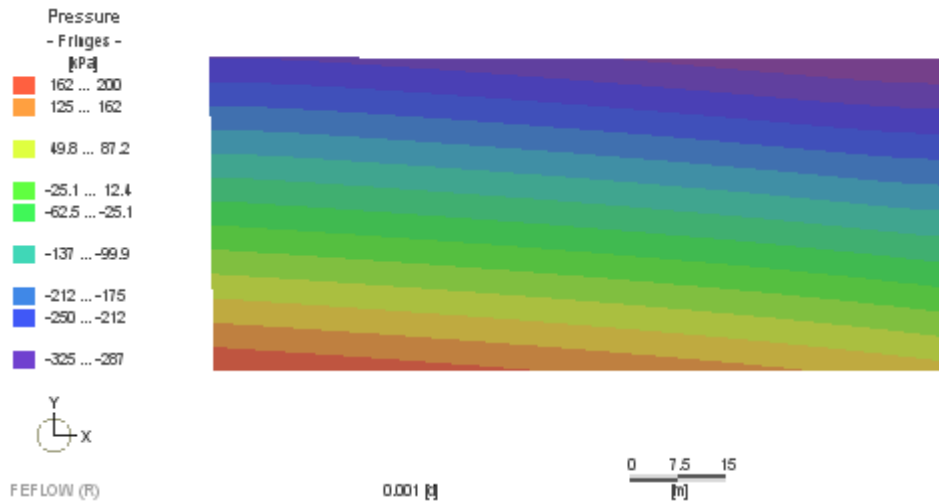
První úlohou, kterou jsme zkoušeli nasimulovat byla úloha ustálené hladiny.



Obrázek 4-1 rozložení saturace ustálené úlohy na testovací obdélníkové oblasti

Úlohu jsme simulovali na obdélníkové oblasti. Jednalo se vertikálně orientovaný 2D model se základním nastavením materiálových parametrů daným programem FEFLOW. Na části levé hranice obdélníku jsme zadali Dirichletovu okrajovou podmínku pomocí hodnoty piezometrické výšky, tuto hodnotu jsme zvolili 15 m, na části pravé strany oblasti jsme zvolili hodnotu piezometrické výšky 10 m. Na zbytku hranice oblasti jsme zadali nulový tok (tedy homogenní Neumannovu podmínku). Tento model jsme zvolili, neboť jsme dokázali snadno předpovědět jak má ustálená hladina vypadat. Očekávali jsme na pravé straně saturaci materiálu do deseti metrů, na levé straně do 15 m a víceméně hladkou hranici plně saturovaného materiálu.

Na obrázku 4-1 je vidět výsledné rozložení saturace a na obrázku 4-2 pole kontur tlaku. Na této úloze jsme otestovali základní nastavení softwaru FEFLOW, např. nastavení počátku souřadnic, na kterém při vertikální orientaci závisí hodnota piezometrické výšky. Pro vyšší přesnost výpočtu jsme v programu FEFLOW zvolili odhad počtu vygenerovaných elementů sítě 5000. To je vrchní hranice užití licence FEFLOW. Základní nastavení materiálových vlastností jsme neměnili.

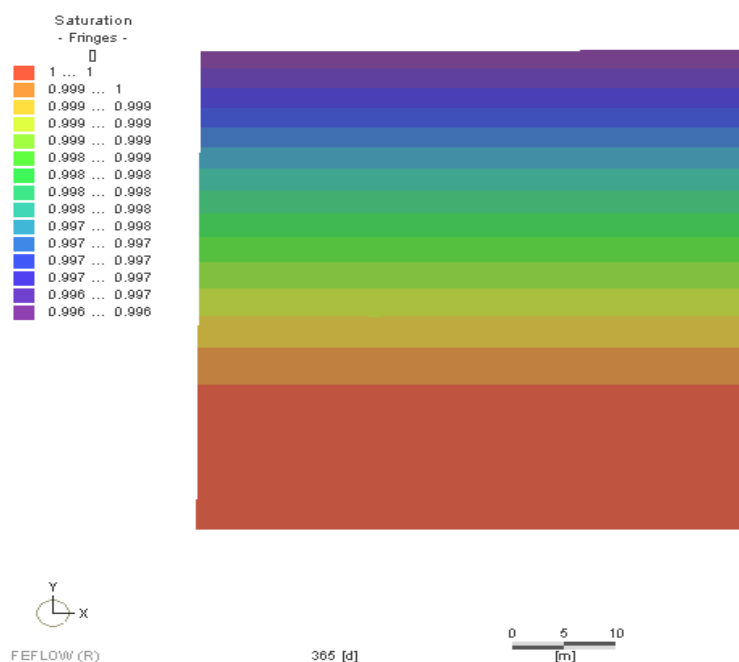


Obrázek 4-2 pole kontur tlaku ustáleného modelu

Počátek souřadnic jsme zvolili v levém dolním rohu oblasti. Simulace vyšla podle očekávání. Jak je hranice plně saturovaného materiálu hladká závisí na počtu prvků sítě. Rozsah kapilární třásně nad plně saturovaným materiálem závisí na retenční křivce materiálu.

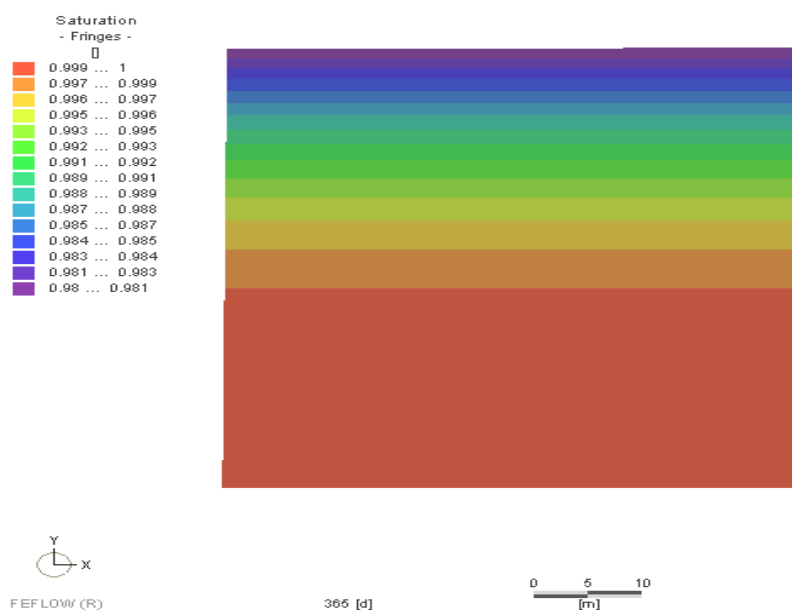
## 4.2 ROZSAH KAPILÁRNÍ TŘÁSNĚ

Tato část popisuje 2D modely neustáleného proudění v nesaturované zóně, které jsme prováděli za účelem vyhodnocení vlivu retenční křivky na rozsah kapilární třásně nad hladinou saturovaného materiálu. Tento typ modelů jsme testovali na stejné geometrii. Na vertikálně orientované 2D oblasti o šířce a výšce přibližně 50m. Počátek souřadnic jsme opět zvolili v levém dolním rohu oblasti.



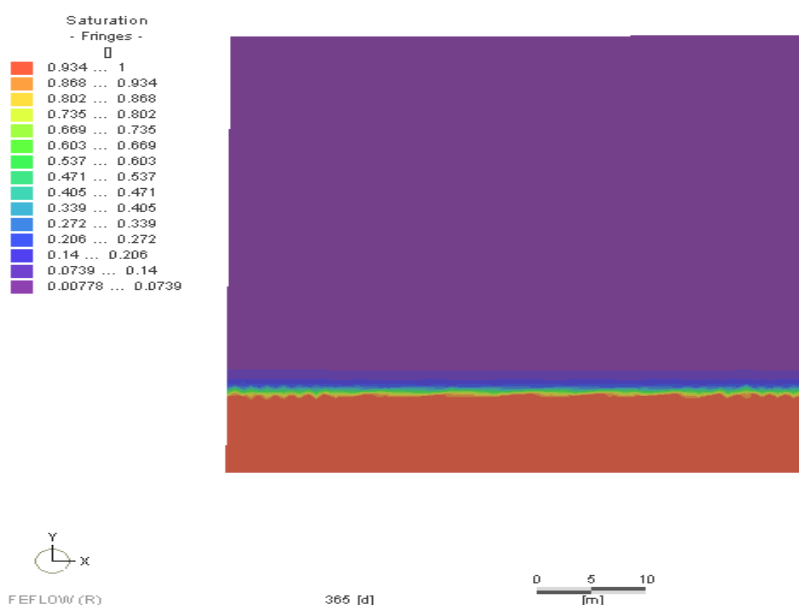
Obrázek 4-3 Kapilární třáseň v bentonitu





**Obrázek 4-4 Kapilární tráseň v hornině**

Jediné co jsme změnilí oproti základnímu nastavení materiálových vlastností byly parametry van Genuchtenovské retenční křivky. V každém modelu jsme pro celou oblast změnilí parametry retenční křivky. Sledovali jsme vliv retenční křivky bentonitu, horniny a křivky se základními koeficienty van Genuchtenova modelu, které FEFLOW automaticky materiálu přiřadí.



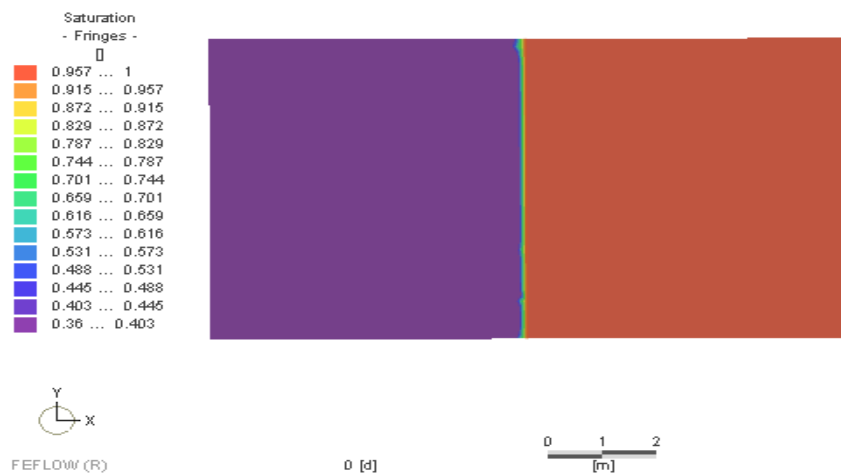
**Obrázek 4-5 Kapilární tráseň s retenční křivkou běžného materiálu v programu Feflow**

Na spodní straně oblasti jsme zadali Dirichletovu okrajovou podmínku v podobě piezometrické výšky o hodnotě 10 m. Na zbytku hranice jsme zadali homogenní Neumannovu podmínku, tedy nulový tok. Simulaci jsme nechali proběhnout do ustálení pro všechny modely. Očekávali jsme vystoupaní hladiny do 10 m a nad touto hladinou by se vlivem kapilárního sání

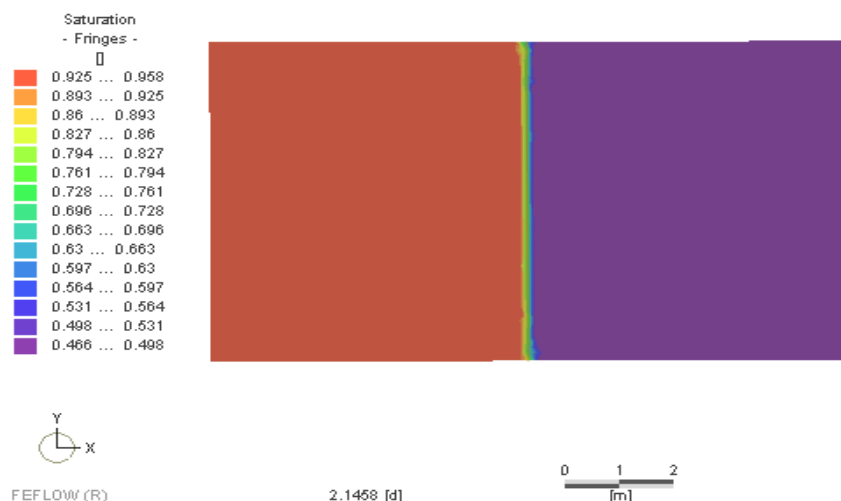
(koeficientů retenční křivky) materiálů měla vytvořit kapilární třáseň. Pravděpodobně vlivem nízké hydraulické vodivosti základního materiálu FEFLOW ( $10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) se nad modely s retenční křivkou bentonitu a horniny téměř plně saturoval celý rozsah oblasti nad očekávanou hladinou. Saturace materiálu s popsány vlastnostmi je po ustálení vyobrazena pro bentonit na obrázku 4-3, pro horninu na obrázku 4-4. A rozsah kapilární třáseň v běžném materiálu, který užívá FEFLOW, je vyobrazen na obrázku 4-5.

### 4.3 USTÁLENÍ SATURACE MEZI MATERIÁLY S RŮZNOU RETENČNÍ KŘIVKOU

Tento typ modelů sloužil k otestování ustálení toku saturace mezi dvěma materiály, s různou retenční křivkou. Za tímto účelem jsme vytvořili 2D model na vertikálně orientované obdélníkové oblasti o šířce 5 m a délce 2 m



**Obrázek 4-6 Počáteční rozložení saturace**



**Obrázek 4-7 Saturace bentonitu (nalevo) a horniny (napravo) po dvou dnech**

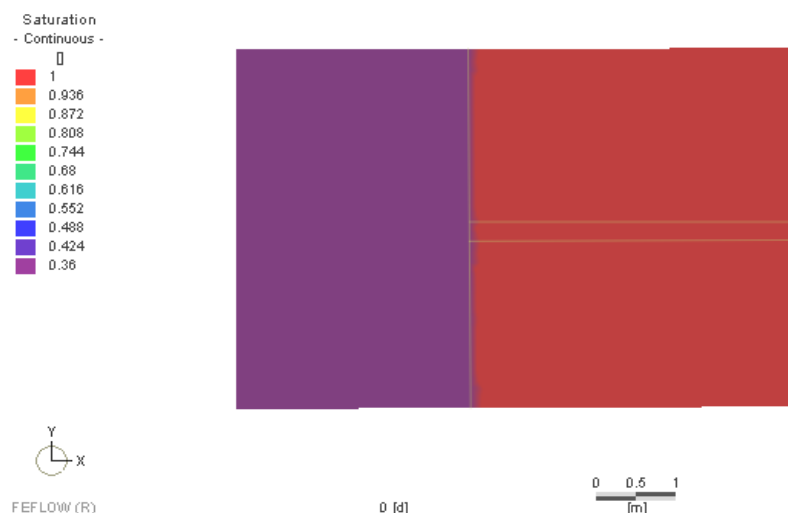
Okrajovou podmínkou byl v tomto typu modelů nulový tok na celé délce hranice. Počáteční podmínka byla zvolena 0.36 (stejně jako počáteční saturace bentonitu podle [1]) pro levou část oblasti, a saturace 1 pro pravou část oblasti, počáteční rozložení saturace je na obrázku 4-6. V každé z těchto podoblastí jsme materiálu zadali rozdílné parametry van Genuchtenova vztahu.

V běžných materiálech (zkoušeli jsme v levé části zadat retenční křivku horniny a v pravé křivku základního materiálu programu FEFLOW) převáží gravitační síla a voda steče dolů. U modelů, kdy pro levou část modelu zadáme koeficienty retenční křivky bentonitu, však převáží kapilární síly a tento materiál prakticky veškerou vlhkost nasaje. Podle simulace by tento děj proběhl velmi rychle a to v čase kratším než dva dny, neboť základní hydraulická vodivost daná FEFLOW je  $10^{-4}$  m.s<sup>-1</sup>. Hydraulická vodivost bentonitu i horniny je ve všech případech simulovaných na základě [1] o několik řádů nižší.

#### 4.4 ZJEDNODUŠENÝ OSOVĚ SYMETRICKÝ MODEL

Tento typ modelu byl geometrickým zjednodušením základní úlohy popsané v [1]. Od obdélníkového 2D modelu vyrovnávání saturace na rozhraní materiálů s retenční křivkou horniny a bentonitu jsme přešli k axi-symetrickému 2D modelu, kde obdélník představuje meridiánový řez válcem. Obdélníkový řez je přibližně 5 m široký a 2 m vysoký. V polovině výšky tohoto obdélníkového řezu se nachází proužek materiálu, reprezentující puklinu. Jednotlivým materiálům jsme zadali všechny parametry základního případu popsané v kapitole 3.3. Počátek souřadnic jsme zvolili opět v levém dolním rohu úlohy.

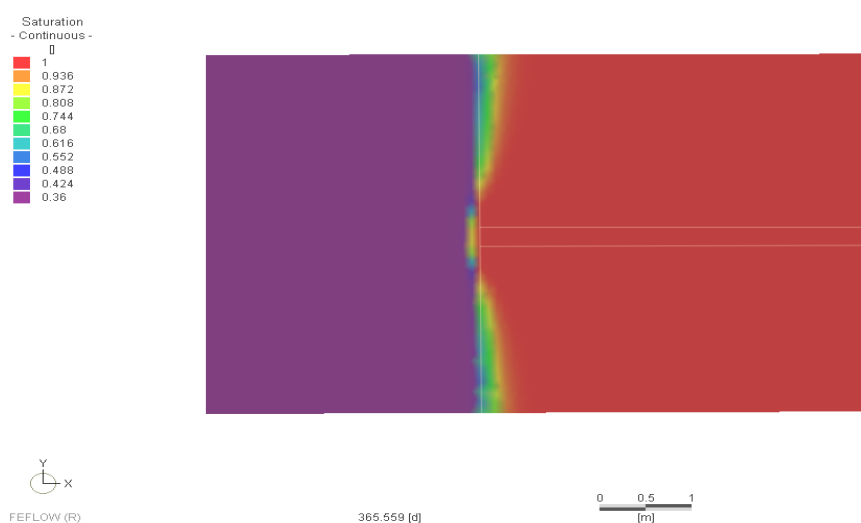
Na pravé straně tohoto obdélníkového řezu jsme zadali dirichletovu podmínku pomocí piezometrické výšky, tuto hodnotu jsme zvolili 200 m, to odpovídá přibližně 2 Mpa. Na zbytku hranice oblasti jsme zadali homogenní Neumannovu podmínku. Jako počáteční podmínku jsme zvolili materiál horniny i pukliny plně saturovaný a pro materiál bentonitu, nalevo, jsme zvolili počáteční saturaci 0,36 Geometrie řezu této oblasti včetně zakreslených počátečních podmínek je vyobrazena na obrázku 4-8.



**Obrázek 4-8 Geometrie a počáteční podmínky zjednodušeného axi-symetrického 2D modelu**

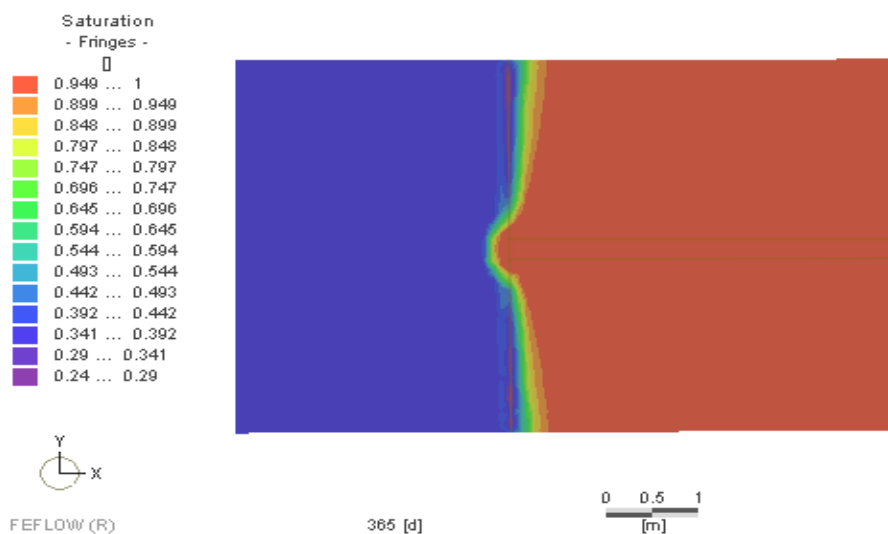
Pro tento typ modelů jsme zpočátku využili základní nastavení numerických metod. Při tomto nastavení hrála velkou roli volba horní meze časového kroku. Výpočet jsme v tomto modelu prováděli pomocí Picardových iterací. Tímto způsobem jsme dopočítali rozložení

saturation pro jeden rok. Pro zmíněnou numerickou metodu výpočet probíhal při maximálním časovém kroku 1 den po dobu několik hodin. Při pokusu zvýšit délku kroku vznikaly v okolí rozhraní materiálů numerické chyby a oscilace, které po několika krocích znehodnotily celý výpočet. Po době 1 rok se bentonit částečně saturoval pouze na tenké oblasti s puklinou, tato oblast je vyobrazena na obrázku 4-9. Tato tenká saturovaná oblast bentonitu na rozhraní s puklinou v nás vzbudila podezření na nesprávný průběh výpočtu a zaokrouhlení rozdílných hodnot saturace na rozhraní numerickým softwarem. Tato tenká saturovaná oblast mohla být také způsobena velmi nízkou hydraulickou vodivostí bentonitu  $6,4 \cdot 10^{-14} \text{ m.s}^{-1}$ . Bylo třeba prozkoumat domněnku, že se nejedná o chybný výpočet. Model jsme zkusili dopočítat do 36500 d, výpočet však běžel několik dnů a poté program FEFLOW havaroval.



**Obrázek 4-9 saturace ve zjednodušeném modelu po jednom roce**

Zkusili jsme nasimulovat průběh saturace opět v čase 1 rok na modelech blízkých tomuto, ale s vyšší hydraulickou vodivostí materiálu představujícího bentonit.

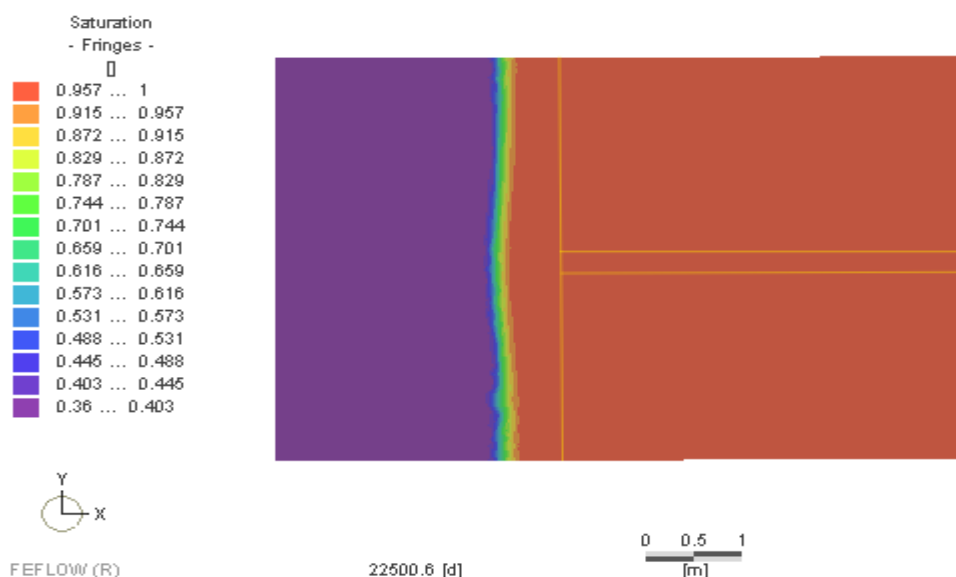


**Obrázek 4-10 saturace v modelu s hydraulickou vodivostí bentonitu  $10^{-13} \text{ m.s}^{-1}$  v čase 1 rok**

V těchto modelech se Bentonit skutečně saturoval ve větším rozsahu, jak je vidět např. na obrázku 4-10, který zachycuje rozložení saturace po jednom roce v modelu s hydraulickou vodivostí bentonitu  $10^{-13} \text{ m.s}^{-1}$ .

Tento test jsme provedli ještě pro materiály s retenční křivkou bentonitu, a hydraulickou vodivostí  $10^{-12} \text{ m.s}^{-1}$  až  $10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$

Abychom byli schopni v „rozumném“ čase dopočítat modely do 100 let požadovaných v dokumentaci[1] zkusili jsme model nasimulovat pomocí Newtonovy metody. Ta pro povolenou délku kroku větší než 1 den přestala konvergovat také. Odladit nestability ve výpočtu pro vyšší délku časového kroku se nám povedlo pomocí volby FEFLOW “Check additionally capillary head and saturation error” pro softwarovou kontrolu vznikajících chyb. Numerické metody v modelu s touto konfigurací konvergovaly až do požadovaných 100 let. Doba výpočtu se zredukovala na několik minut. Dopočítané rozložení saturace je na obrázku 4-11



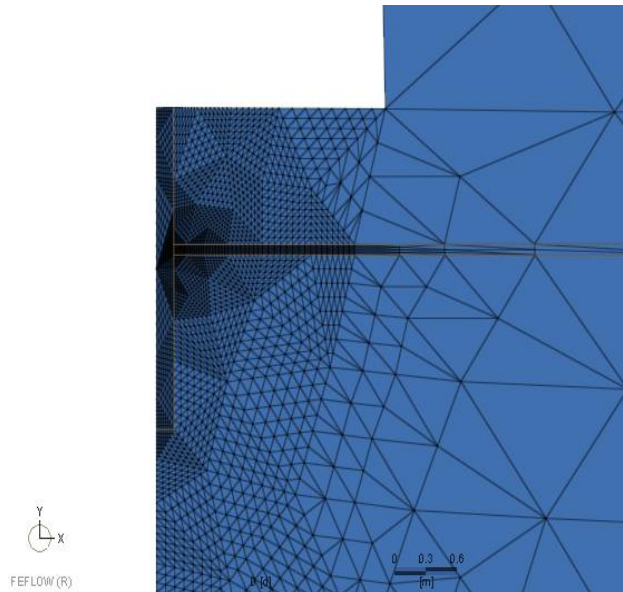
**Obrázek 4-11 saturace v testovacím modelu po 100letech**

#### 4.5 PŘILOŽENÉ TESTOVACÍ MODELY

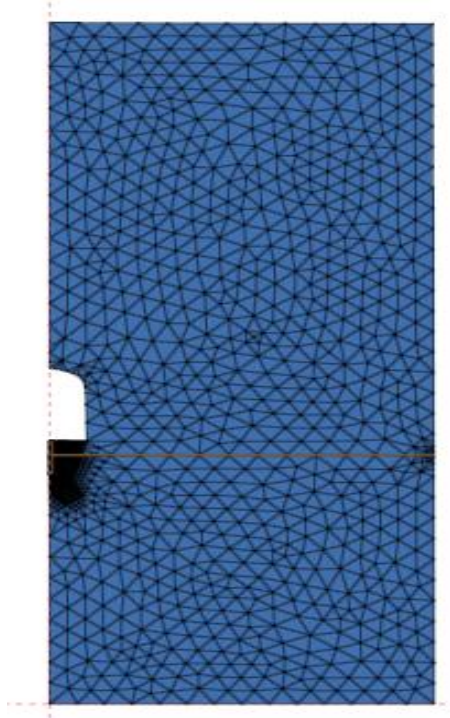
Modely popsané v této kapitole jsou přiloženy na datovém CD v adresáři „Modely pro otestování vlivu parametrů“. Modely z každé podkapitoly se nachází v samostatném adresáři. Ustálená úloha se nachází v adresáři „Ustalena uloha“. Modely pro otestování rozsahu kapilární trásně se nachází v adresáři „Rozsah kapilarni trasne“. Modely pro test ustálení saturace mezi různými materiály se nachází v adresáři „Vyrovnavani saturace“. Jednodušší osově symetrický model s parametry základního případu je umístěn v adresáři „Zjednoduseny model“.

## 5 POPIS MODELŮ VYTVOŘENÝCH PODLE BENCHMARKU TASK 8

Při přechodu od obdélníkové oblasti k oblasti s přesnou geometrií a všemi parametry definovanými v [1] jsme pro dosažení vyšší přesnosti výpočtu v okolí bentonitového válce snížili velikost konečných prvků sítě. Pro toto “zhuštění” sítě jsme využili funkci FEFLOW označovanou jako “refine”. Délka hrany prvku v okolí vzorku bentonitu měřila po tomto “zhuštění” kolem 1 cm. Upravená síť konečných prvků okolí bentonitu ve 2D řezu osově symetrickým modelem je na obrázku 5-1. Celkový pohled na síť konečných prvků je na obrázku 5-2.



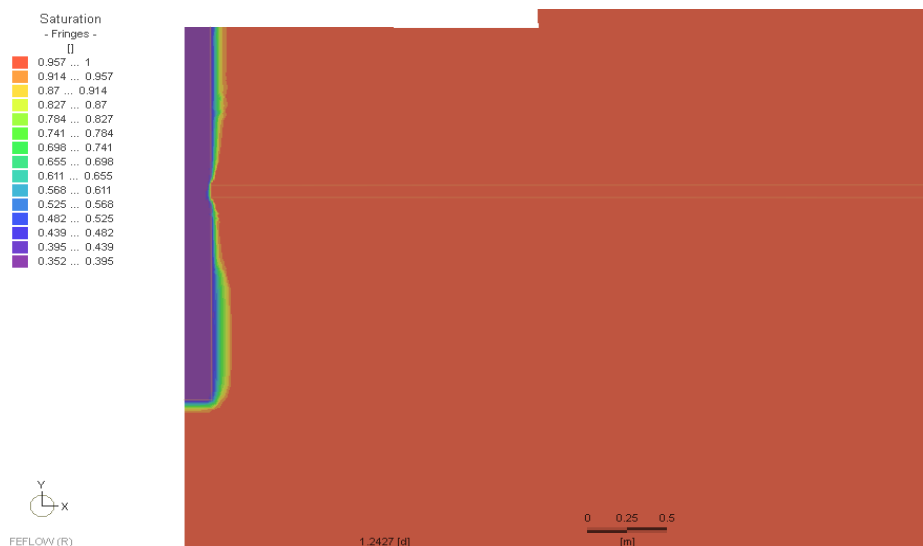
**Obrázek 5-1 , síť konečných prvků zhuštěná v okolí bentonitu**



**Obrázek 5-2, pohled na podobu sítě v celé oblasti**

## 5.1 POPIS SIMULACE ZÁKLADNÍHO PŘÍPADU

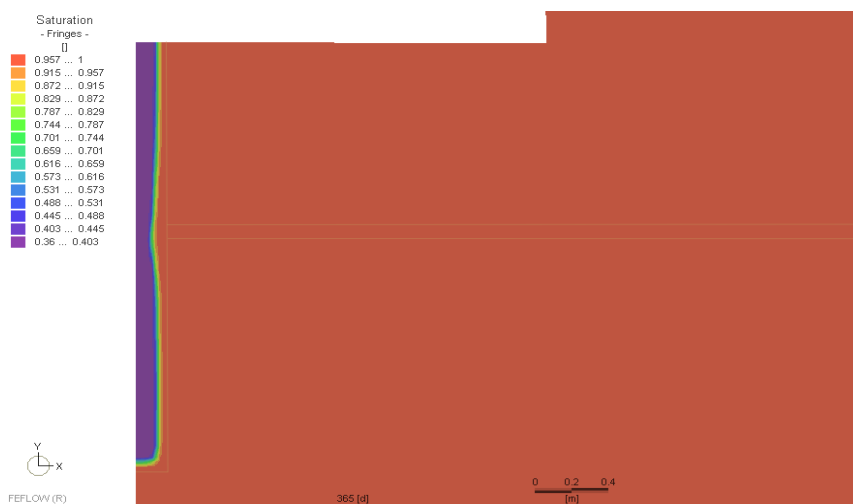
Už u základního případu jsme zaznamenali zásadní potíže s konvergencí numerických metod, které program FEFLOW v základu použije. Model začal v krátkém čase oscilovat na rozhraní bentonitu a žuly. Numerické chyby se pak v průběhu simulace rozšířily do celé oblasti představující horninu. Tento problém jsme částečně vyřešili opětovnou volbou, kterou FEFLOW obsahuje, zaškrtnutím políčka “Check additionally capillary head and saturation error”. FEFLOW dále také obsahuje nastavitelné kritérium “hysteresis reversal point criterion”, dále označujeme jako hysterezní kritérium. Toto kritérium určuje minimální rozdíl tlakových výšek, při kterém dojde k hysterezi, tj. obratu mezi nasákáním a osoušením materiálu. Některé modely hysterezi vyžadují, v našem případě je však nízké hysterezní kritérium spíše zdrojem numerických chyb, dochází k prudké oscilaci hodnot saturace v okolí rozhraní s horninou. Abychom hysterezi z modelu odstranili měli bychom jako hysterezní kritérium zadat dostatečně “velké” číslo. Několika testy jsme našli hodnotu  $10^9$ m.



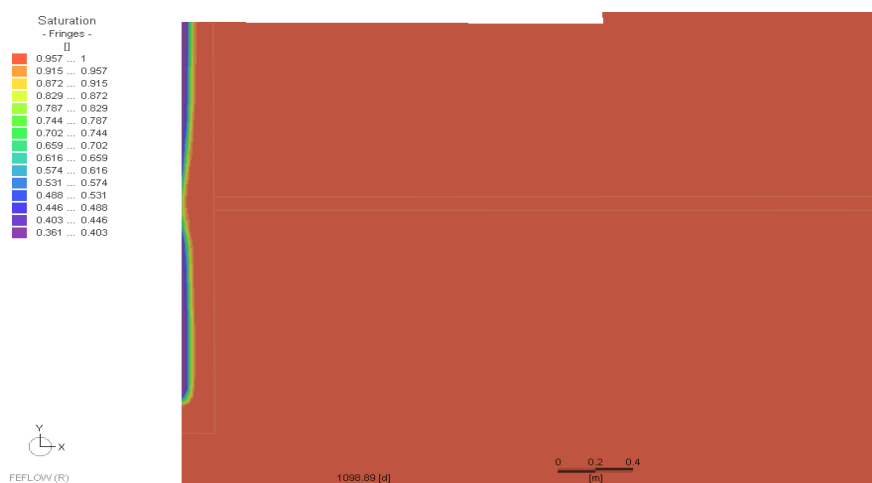
**Obrázek 5-3 Rozložení saturace v základním případě po 1 dnu**

Pro řešení soustavy nelineárních rovnic vzniklých diskretizací úlohy program použije některou z iterativních metod. Buď metodu Picardových iterací, která je nastavena v základu, nebo můžeme vybrat Newtonovu metodu. Metoda Picardových iterací vyžaduje řešení symetrických soustav lineárních rovnic. K tomu jsou k dispozici dvě iterativní numerické metody, ve FEFLOW označované jako PCG, metoda sdružených gradientů s předpodmíněním, a SAMG což je metoda algebraických multigradů implementovaná ve FEFLOW. Newtonova metoda využívá těchto metod šest. K dispozici jsou iterativní maticové řešiče Orthomin, což je zkratka pro restartovanou orthogonální minimalizaci, GMRES generalizovaná metoda nejmenších residuí, CGS rychlý řešič Lanczosova typu, BiCGSTAB generalizovaná metoda dvojitě sdružených gradientů, BiCGSTABP generalizovanou metodu dvojitě sdružených gradientů s předpodmíněním, SAMG což je opět označení pro metodu algebraických multigradů.

Než se v průběhu simulace saturoval bentonit v okolí rozhraní s žulou, tak metoda Picardových iterací opět konvergovala značně pomalu (výpočet do simulačních 36500 dnů by trval několik dní) a po určité době výpočet havaroval úplně. Zjistili jsme, že v této části simulace konverguje Newtonova metoda značně rychleji, stejně jako ve zjednodušeném modelu v kapitole 4. Dále bylo třeba vybrat iterační numerickou metodu pro řešení soustav rovnic, které Newtonova metoda vyžaduje. Původně nastavená metoda BiCGSTABp v programu Feflow nekonvergovala. Místo ní v tomto základním případě konvergovala metoda sdružených gradientů BiCGSTAB. V simulačním čase, kdy se začne saturace zvyšovat v okolí centrální osy modelu, však přestává Newtonova metoda konvergovat, ale v této fázi simulace opět konverguje metoda Picardových iterací. Dokonce konverguje rychleji než Newtonova metoda. Na obrázcích 5.3-5.5 je postupně vyobrazeno spočtené rozložení saturace v okolí bentonitu po 1 dnu, 1 roce a 3 letech. Metoda picardových iterací konvergovala dostatečně rychle už po 1 roce, kdy se saturovalo rozhraní bentonitu s horninou a puklinou.



**Obrázek 5-4 Rozložení saturace v základním případě po 1 roce**



**Obrázek 5-5 Rozložení saturace v základním případě po 3 letech**



## 5.2 MODELOVÁNÍ ODVOZENÝCH PŘÍPADŮ

Při modelování požadovaných případů jsme zjistili, že zvolit vhodnou kombinaci numerických metod nestačí. U některých modelů nekonvergovala s dostatečnou přesností žádná z uvedených kombinací numerických metod. U modelů nesaturovaného proudění záleží také na formulaci Richardsovy rovnice, kterou simulační software pro výpočet použije. Některé modely konvergovaly až když jsme změnili formulaci z původní, označovanou ve FEFLOW jako „head based (standard)“, na formulaci rovnice označovanou ve FEFLOW jako „Mixed head-saturation“. Použité numerické metody včetně intervalů, kdy konvergovaly jsou uvedeny v tabulce 5-1. V Prvním sloupci tabulky 5-1 je číselné označení modelovaného případu na základě [1] a popsané v kapitole 3. V následujících třech sloupcích je označení iterativní metody pro řešení nelineární soustavy rovnic vzniklé diskretizací úlohy. V dalších třech sloupcích je označení iterativní metody pro řešení soustav lineárních rovnic, daných metodou tabelovanou v odpovídající kolonce prvních 3 sloupců. V předposledních třech sloupcích jsou uvedeny časové intervaly ve kterých odpovídající kombinace numerických metod konvergují s dostatečnou přesností, tzn. FEFLOW nezahlásí error, ani se neobjeví numerické oscilace. V posledním sloupci je typ parametru, který byl oproti základnímu modelu změněn. N zde značí použití Newtonovy metody při základní formulaci rovnice. N(h-s) značí užití Newtonovy metody na soustavu nelineárních rovnic, danou formulací rovnice „Mixed head-saturation“. Pic je označení pro Picardovu metodu. V následujících třech sloupcích PCG, značí řešič PCG. BiCG a BiCGP, značí řešiče BiCGSTAB a BiCGSTABp. SAMG značí metodu algebraických multigrídů implementovanou ve FEFLOW a Orth značí metodu restartované ortogonální minimalizace, ve FEFLOW zkracovanou na ORTHOMIN. A v posledním sloupci K:h-p značí model, kdy jsme sledovali vliv hydraulické vodivosti horniny a pukliny, K:ben značí modely, kde jsme sledovali vliv hydraulické vodivosti bentonitu. U případu 9 bentonit na rozhraní s horninou odsaturoval horninu nejvíce. K\_bez\_rohu, K\_bez\_rohu\_refine, K 0,5 parametru značí upravené modely případu které jsme vytvořili ve snaze otestovat, zda se nejedná o chybu ve výpočtu při modelování tohoto případu. Zmíněné varianty modelu 9 jsou popsány v kapitole 6.3.2. RTCben,Haverkamp značí případ 19 pro otestování vlivu retenční křivky bentonitu zadané pomocí modifikovaného Haverkampova vztahu, RTCben,van Genuchten značí případ 19 s retenční křivkou zadanou pomocí van Genuchtenova vztahu. Model ve kterém jsme zkoušeli zadat retenční křivku pomocí exponenciálního vztahu sice konvergoval, ale rozdíl v průběhu saturace byl poměrně velký rozdíl. Pro exponenciální retenční křivku jsme však nezaznamenali tak dobrou shodu s křivkou případu 19 jako u předchozích 2 vztahů. Model případu 19 s exponenciální retenční křivkou je označen v posledním sloupci poznámkou exponential. Optimalizace parametrů retenčních křivek na retenční křivku případu 19 je popsána v kapitole 3. RTC:p-h značí případ retenční křivky zadané pro materiál představující horninu i puklinu. RTC:p případ retenční křivky

zadané pro materiál představující puklinu. RTC. Por:p-h značí případ pro otestování porosity 0,003 pro materiál horniny i pukliny.

Výpočet každého případu, probíhal podle této tabulky. Spočetli jsme pomocí dané kombinace metod stav systému v nejvyšším čase, kdy v tabulce uvedená kombinace metod ještě konvergovala. Tento stav jsme vzali jako počáteční podmínku pro model, který využil jiné kombinace metod. Takto jsme pro všechny typové případy dopočítali pomocí nejvýše tří následujících modelů stav po sto letech, přibližně 36500 dnech. Každému intervalu konvergence odpovídá jeden soubor s příponou “\*.fem”.

**Tabulka 5-1 tabulka intervalů konvergence a užitých metod pro př. 1-22**

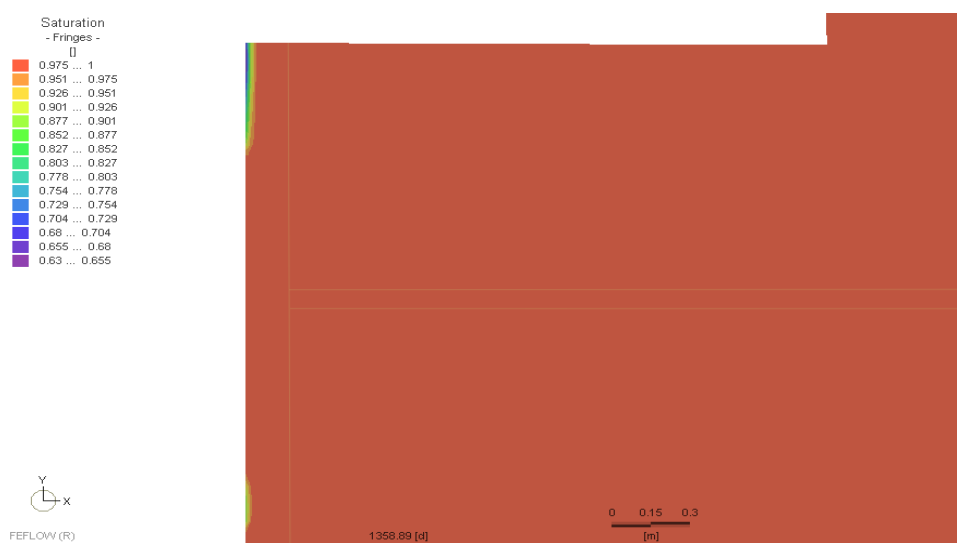
př.	iterační metoda		met. pro řešení s.r.			časové intervaly jednotlivých př.[d]				
1	N	Pic	BiCG	PCG		0-365	365-36500		K:h-p	
2	N	N(h-s)	N	BiCG	BiCG	Orth	0-2000	2000-18800	18800-36500	K:h-p
3	N	N	Pic	SAMG	Orth	PCG	0-2600	2600-8000	8000-36500	K:h-p
4	N	Pic		BiCGP	PCG		0-365	365-36500		K:h-p
5	N	N	N	SAMG	BiCG	Orth	0-3650	3650-23000	23000-36500	K:h-p
6	N	Pic		BiCG	PCG		0-3700	3700-36500		K:h-p
7	N	Pic		BiCG	PCG		0-365	365-36500		K:h-p
8	N	Pic		BiCG	PCG		0-365	365-36500		K:h-p
9	N			BiCG			0-36500			K:h-p
9	N			BiCG			0-36500			K:h-p bez_rohu
9	N			BiCG			0-36500			K:h-p pas 0.5
9	N			BiCG			0-36500			K:h-p bez_rohu_refine
10	N	Pic		BiCG	PCG		0-10000	10000-36500		K:h-p
11	N	Pic		BiCG	PCG		0-800	800-36500		K:h-p
12	N	Pic		BiCG	PCG		0-365	365-36500		K:h-p
13	N	N(h-s)	N	BiCG	BiCG	Orth	0-6800	6800-18800	18800-36500	K:h-p
14	N	Pic		BiCG	PCG		0-3650	3650-36500		K:h-p
15	N	Pic		BiCG	PCG		0-365	365-36500		K:h-p
16	N	Pic		BiCG	PCG		0-365	365-36500		K:h-p
17	N	Pic		BiCG	PCG		0-500	500-36500		K:ben
18	N	Pic		BiCG	PCG		0-400	400-36500		K:ben
19	N	N	Pic	BiCG	Orth	PCG	0-100	100-500	500-36500	RTCben,Haverkamp
19	N	N	Pic	SAMG	BiCG	PCG	0-35	35-500	500-36500	RTCben, van Genuchten
19	N	Pic		BiCG	PCG		0-15000	15000-36500		RTCben, exponential
21	N	Pic		BiCG	PCG		0-365	365-36500		RTC:p-h
22	N	Pic		BiCG	PCG		0-800	800-36500		por:p-h

Při prvním návrhu geometrie modelů jsem udělal chybu v rozměrech oblasti, poloměr šířky podstavy tunelu, tedy šířka výřezu byla 5m. Tuto chybu jsem odhalil až po spočtení modelů. Požadovanou sadu modelů bylo tedy třeba vytvořit prakticky od začátku. Tabulka užitých metod a jejich intervalů konvergence je pro původní sadu s odlišnou geometrií modelů uvedena v příloze 3. Řešené modely jsou pro všechny případy přiloženy na datovém CD. Každému intervalu konvergence odpovídá jeden z modelů “\*.fem”. Číselné označení případu, je uvedeno na začátku názvu souboru, interval konvergence je uveden na konci názvu, těsně před příponou “\*.fem”. Soubory s původní geometrií jsou uvedeny v adresáři

modely\_Spatna\_Geometrie. Soubory se správně definovanou geometrií (podle [1]) jsou uvedeny v adresáři modely.

### 5.3 VYHODNOCENÍ SPOČTENÝCH MODELŮ

V dokumentaci [1] požadovali pro vyhodnocení saturace bentonitu vykreslení vývoje saturace v čase ve dvou bodech ležících na centrální ose modelu. Tyto dva body leží v hloubce 1,5m (v rovině pukliny) a 2,25m (zhruba v polovině vzdálenosti mezi puklinou a dnem válečku vyplněného bentonitem) od vrchu části vyplněné bentonitem. Interval ve kterém jsme sledovali saturaci bentonitu je 36500dnů, tedy 100 let. Tyto křivky slouží hlavně k odhalení případných nestabilit ve výpočtu, které by se měly projevit numerickou oscilací. Dále tyto křivky mohou sloužit pro samotné vyhodnocení průběhu saturace v čase vrůzných materiálech. Při pokusu o export těchto grafů program FEFLOW 6.0 havaroval. Selhaly i všechny snahy o sloučení výsledných souborů se spočteným rozložením saturace. Grafy jsou tedy oddělené pro jednotlivé intervaly konvergence. Tyto grafy jsou přiloženy na datovém CD v adresáři „grafy saturace“ jako bitmapové soubory, název souboru vždy začíná označením případu a před příponou „.BMP“ je uveden příslušný interval konvergence. Čas kdy se bentonit téměř plně saturuje přibližně odpovídá času kdy se saturace, kterou sleduje křivka s číslem 2, začne rovnat 1. Tedy bentonit se téměř plně saturuje, když se bod na centrální ose modelů 2,25m od vrchní části oblasti vyplněné bentonitem saturuje. Jako úplně poslední se ve většině modelů saturuje tenká oblast přilehlá k vrchní stěně vzorku bentonitu a k centrální ose modelu. Na obrázku 5-6 jsou vidět zmíněné dvě oblasti v modelu základního případu. Tyto dvě oblasti se pro většinu případů saturují jako poslední. O něco rychlejší je saturace spodní oblasti neboť se nachází blíž ke spodní hraně bentonitového vzorku, kterou se bentonit saturuje po puklině nejvíce intenzivně.



5-6 základní případ v čase 1358 d, v čase 1418 d je bentonit již téměř plně saturovaný

### 5.3.1 PRŮBĚH SATURACE V JEDNOTLIVÝCH PŘÍPADECH

U většiny případů se průběh postupné saturace bentonitu podobá základnímu případu. Během velice krátké doby, do dvou spočtených dnů, bentonit horninu ve svém blízkém okolí částečně desaturuje. Následně se začíná saturovat puklinou. V souladu s očekáváním, založeném na vertikálním 2D modelu, popsaném v dokumentaci [1], na str.27 postupuje saturace bentonitu puklinou ve vertikální směru rychleji než v horizontální rovině. Jakmile se v libovolném z modelů bentonit saturoval v blízkosti rozhraní s horninou, saturovala se i částečně odsaturovaná hornina v okolí tohoto rozhraní.

V téměř všech spočtených případech se bentonit plně saturoval, v čase kratším než 100 let. Jedinou výjimkou byl případ 9, tedy případ, bez pukliny, kdy byla hydraulická vodivost horniny zvolena řádově stejná jako hydraulická vodivost bentonitu ( $K_{\text{horniny}} = 10^{-14} \text{ m.s}^{-1}$ ,  $K_{\text{bentonitu}} = 6,4 \cdot 10^{-14} \text{ m.s}^{-1}$ ). V tomto případě se bentonit výrazněji saturoval pouze přes okolí spodního rohu bentonitového válce. Na obrázku 5-7 je vykresleno pole kontur vypočítané částečné saturace bentonitu v základní verzi modelu 9 po sto letech, puklina na obrázku má zadané stejné materiálové parametry jako hornina.

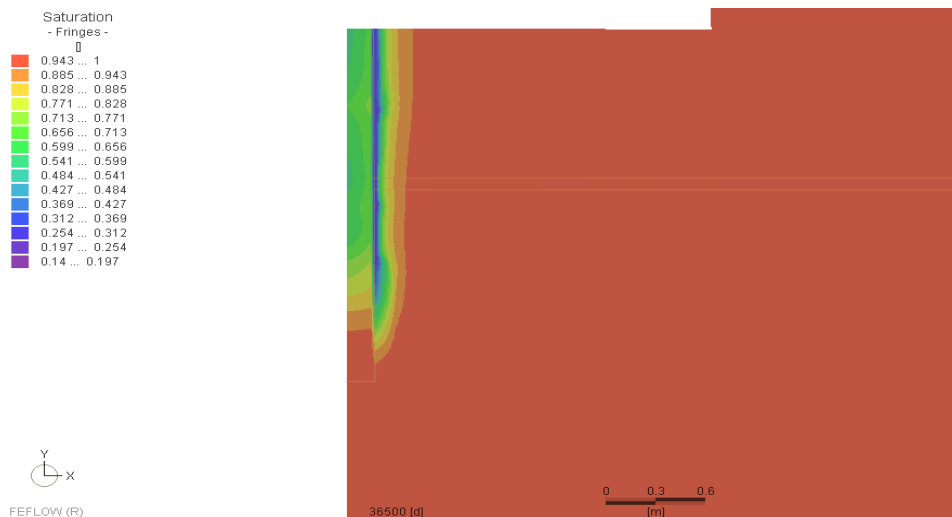
Čas, kdy se bentonit v jednotlivých případech plně saturoval je uveden v tabulce 5-2. V prvním řádku tabulky je postupně uveden čas plné saturace bentonitu pro případy 1 až 8, ve druhém řádku pro případy 8 až 16 a ve třetím řádku pro modely 17 až 22. Vzhledem k horní hranici délky časového kroku užitě při numerické simulaci zvolené 10 dnů, jsme jako časy téměř úplné saturace zvolili celočíselné násobky 5 dnů mezi časy, kdy bentonit ještě není plně saturovaný a časy kdy již je. V každé z modelovaných variant případu 9 se bentonit saturoval jen částečně. Ve všech variantách případu 9 se bentonit v čase saturoval přibližně stejným tempem. Saturace do oblasti bentonitu přestupovala zejména okolím spodního rohu oblasti vyplněné bentonitem ve všech případech, neobsahujících puklinu (tedy případech 9-12).

Pro případ 19 jsme vytvořili tři modely, s různou retenční křivkou bentonitu. Případ s retenční křivkou zadanou pomocí Haverkampova vztahu je uveden v tabulce 6-2, v tomto případě se bentonit plně saturoval v 815 dnech. Tato křivka měla po optimalizaci parametrů nejlepší shodu s křivkou případu 19.

**Tabulka 5-2 časy téměř úplné saturace bentonitu**

př.1-8	1420	26870	8365	1060	24220	4120	1385	1035
př.9-16	nesat.	9430	2310	1540	27305	4145	1415	1045
př.17-22	2090	905	816	1825	1250	1405		

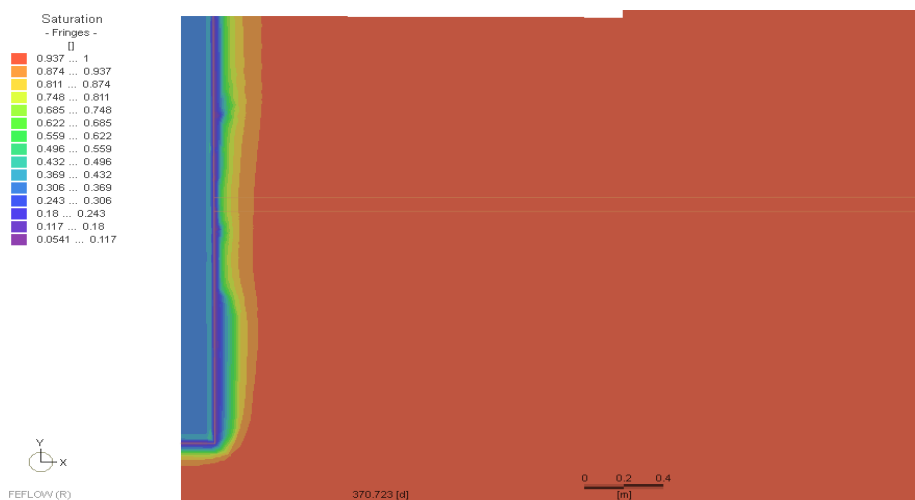
V simulacích s retenční křivkou zadanou pomocí van Genuchtenova a exponenciálního vztahu vyšly časy úplné saturace 594 d a 16557 d. Pro exponenciální retenční křivku jsme však nedocílili tak dobré shody při optimalizaci, jako u předchozích dvou vztahů.



**Obrázek 5-7 saturace v čase 100 let v okolí vzorku bentonitu v případě 9**

### 5.3.2 DESATURACE MATERIÁLU V OKOLÍ ROZHŘANÍ HORNINY A BENTONITU

U modelu případu 9 jsme zaznamenali velmi nízkou hodnotu saturace v blízkém okolí rozhraní s horninou, přibližně 0,117. V domnění, že se jedná o chybu ve výpočtu jsme na základě modelu případu 9 vytvořili následující tři varianty této úlohy. Zkusili jsme odstranit spodní hranu válce vyplněného bentonitem a horniny, tuto hranu jsme nahradili elementy s parametry stejnými jako u horniny.



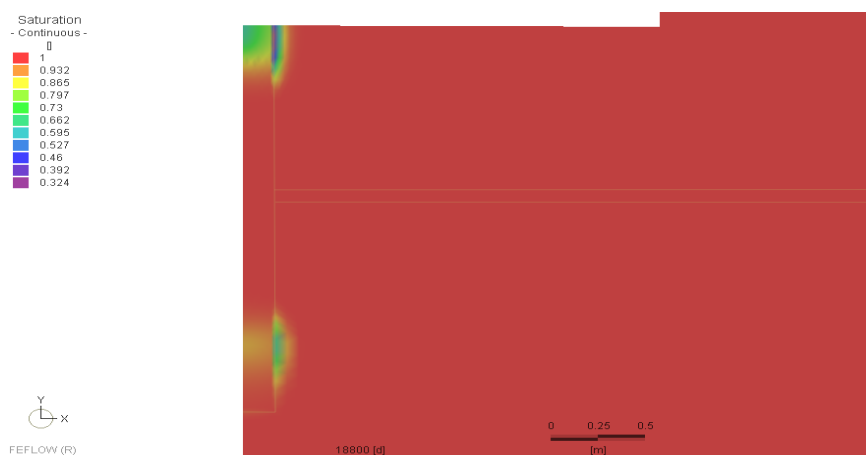
**Obrázek 5-8 desaturace horniny v okolí bentonitu, pro případ 9**

Tento model označujeme, jako „p9\_K\_bez\_rohu“. Model „p9\_K\_bez\_rohu\_refine“ vznikl tak, že jsme v okolí rozhraní bentonitu a horniny zvýšili hustotu konečných prvků pomocí funkce „refine“. Model označený jako „p9\_K\_0,5 parametru“ vznikl tím, že jsme v modelu „p9\_K\_bez\_rohu“, nahradili všechny materiálové vlastnosti pro konečné prvky v okolí rozhraní průměrnou hodnotou odpovídající materiálové vlastnosti bentonitu a horniny.

Žádná ze zmíněných úprav modelu případu 9 neměla vliv na šířku desaturované zóny v hornině, ta sahala přibližně do 20 cm od okraje vzorku bentonitu. Dokonce i hodnota saturace v okolí

rozhraní, zůstala přibližně stejná. Saturace v okolí rozhraní bentonitu a horniny je v čase přibližně 1 rok pro základní verzi případu 9 vykreslena na obrázku 5-8.

Rozdílně oproti základnímu případu postupovala saturace u všech případů s nízkou hydraulickou vodivostí horniny (řádově blízkou hydraulické vodivosti bentonitu), tím máme na mysli případy s hydraulickou vodivostí horniny volenou  $10^{-14} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $10^{-13} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Ve všech těchto případech simulace nasvědčují tomu, že bentonit v okolí rozhraní s horninou horninu desaturuje do větší vzdálenosti, ale stále méně než 20 cm. Na tomto rozhraní dokonce vzniká proužek se saturací nižší než je počáteční saturace bentonitu 0,36. Na rozhraní bentonitu a horniny je poměrně velký rozdíl v průběhu retenčních křivek. Tento rozdíl křivek se výrazným odsaturováním okolí rozhraní zřejmě projeví pouze v případech, kdy je hydraulická vodivost horniny dostatečně nízká a hornina se nedokáže v okolí rozhraní s bentonitem dostatečně rychle saturovat. Takto výrazná desaturace se projevila skutečně pouze v případech 2, 3, 5, 6, 9, 10, 13, 14 a v případě 19. Nejnižší zaznamenaná hodnota saturace v okolí rozhraní horniny a bentonitu byla přibližně 0,045. Tuto hodnotu jsme zaznamenali pro případ 9, v čase kolem 2 let.

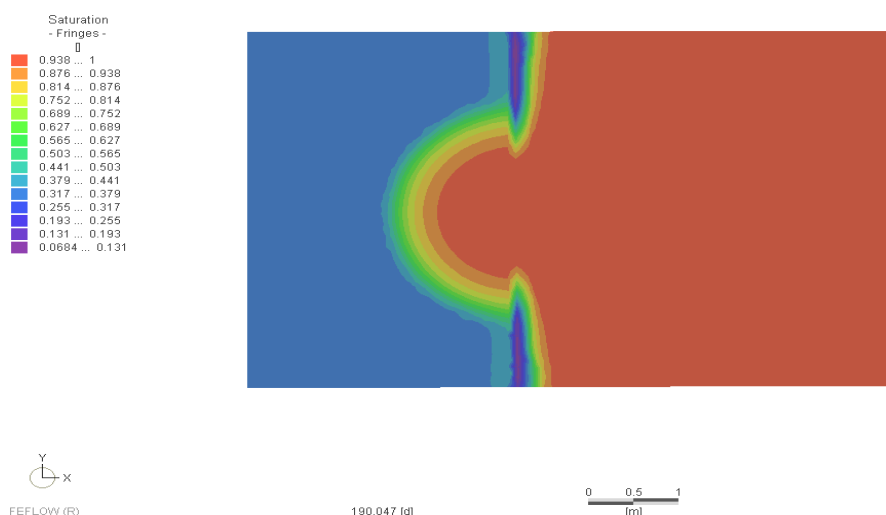


**Obrázek 5-9 saturace pro případ 2 v čase 18800d**

Při snížení hydraulické vodivosti horniny můžeme pozorovat nižší rozsah částečně desaturované zóny a zároveň vyšší hodnoty saturace v okolí rozhraní materiálů. Při hydraulické vodivosti horniny  $10^{-12} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  už hodnoty saturace v okolí rozhraní bentonitu a horniny neklesají pod hodnotu počáteční saturace bentonitu. Zmíněná oblast odsaturované horniny se následně opět saturuje v okolí saturujícího se bentonitu, který v průběhu simulace nasáká vodou skrze puklinu a spodní roh bentonitového vzorku. Na obrázku 5-9 je zachyceno spojitě rozložené saturace v okolí bentonitu pro případ 2 s hydraulickou vodivostí horniny  $10^{-14} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a s vodivostí pukliny  $10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  v čase 18800d. V tomto případě se bentonit postupně saturuje puklinou a spodním rohem bentonitového bufferu. Původně odsaturované okolí rozhraní bentonitu a horniny se opět postupně saturuje v okolí saturovaného bentonitu. Ve zmíněných případech s takto nízkou hydraulickou vodivostí horniny, se oblast přiléhající k bentonitovému válci saturuje až poté co se téměř úplně saturuje bentonit.

V případě 19 se odsaturování horniny přilehlé k bentonitu na méně než 0,36 projevilo, přestože hydraulická vodivost horniny byla  $10^{-12}$  m.s<sup>-1</sup>. K tomuto jevu došlo ve všech simulovaných verzích případu 19. Vznik tohoto rozhraní byl pravděpodobně způsoben retenční křivkou případu 19, která se od retenční křivky bentonitu v základním případě liší. Odsaturovaná hornina v okolí rozhraní s bentonitem se opět jako v předešlých simulacích saturovala, poté, co se saturoval bentonit k tomuto rozhraní přiléhající. V modelech případu 19, kdy jsme zadali retenční křivku bentonitu pomocí van Genuchtenova a Haverkampova vztahu, se bentonit plně saturoval přibližně v časech 600 d a 800 d. V případě, kdy jsme zadali retenční křivku pomocí exponenciálního vztahu, se bentonit plně saturoval až v čase 15000d. Pro exponenciální retenční křivku jsme však nedocílili tak dobré shody při optimalizaci, jako u předchozích dvou vztahů. Ke zmíněnému odsaturování horniny v okolí bentonitu došlo ve všech zmíněných verzích případu 19.

Výrazná desaturace horniny s hodnotou saturace nižší než je počáteční saturace bentonitu vzniká také u zjednodušeného, obdélníkového, axi-symetrického 2D modelu, popsaného v kapitole 4. Zde jsme zkusili měnit hydraulickou vodivost bentonitu. V případech, kdy se hydraulická vodivost bentonitu u zjednodušeného modelu nejvýš o řád blížila hydraulické vodivosti horniny nebo byla vyšší (testovali jsme pro propustnost bentonitu  $10^{-14}$  m.s<sup>-1</sup> až  $10^{-10}$  m.s<sup>-1</sup>, propustnost horniny  $10^{-12}$  m.s<sup>-1</sup>) vznikala v hornině přilehlé k bentonitového vzorku odsaturovaná zóna se saturací nižší než byla zvolená počáteční saturace bentonitu 0,36.



**Obrázek 5-10 zjednodušený model s propustností  $10^{-10}$  m .s-1, v čase 190 d**

Spočtené modely nasvědčují platnosti domněnky, že v případech, kdy je propustnost bentonitu blízká, rovná, a nebo vyšší než propustnost horniny převáží na rozhraní vliv rozdílu retenčních křivek nad saturací okolí vzorku bentonitu skrze póry horniny a skutečně vznikne tenká oblast se saturací nižší než je počáteční saturace bentonitu. Na obrázku 5-10 je vyobrazeno pole kontur tlaku ve zjednodušeném modelu v čase 190 d z kapitoly 4.4 s hydraulickou vodivostí bentonitu  $10^{-10}$ .m.s<sup>-1</sup>.

## 6 ZÁVĚR

Tato práce slouží k lepšímu pochopení hydrogeologických procesů probíhajících na rozhraní bentonitu a žuly a pukliny a byla vytvořena na základě dokumentace k benchmarkové úloze, která je součástí mezinárodního projektu Task Force EBS pro porovnání modelů, jehož se účastní také Technická univerzita v Liberci. V praxi by mohla být využita jako orientační materiál při modelování jevů, ke kterým může dojít na rozhraní bentonitu, horniny, a pukliny v plánovaném typu hlubinných úložišť radioaktivního odpadu. Vzhledem k poměrně vysoké variabilitě materiálových parametrů je v dokumentaci [1] požadováno zpracování 22 axisymetrických 2D modelů, s různým nastavením materiálových parametrů. Geometrie úlohy a parametry zmíněné sady případů jsou popsány v kapitole 3. Puklinu jsme v modelech reprezentovali pomocí tenké vrstvy materiálu s vlastnostmi danými hydraulickými parametry pukliny.

Modely jsme vytvořili v programu FEFLOW 6.0. Ve FEFLOW můžeme pro řešení soustavy nelineárních algebraických rovnic daných diskretizací Richardsovy rovnice, užít metodu Picardových iterací, nebo Newtonovu metodu. Tyto metody vyžadují řešení soustav lineárních rovnic, k jejich řešení FEFLOW obsahuje několik iterativních řešičů. Kombinace metod nekonvergovaly v celém požadovaném intervalu. Simulace bylo třeba rozdělit na několik částí a pro každou vybrat vhodnou kombinaci numerických metod. Volba metod je popsána v kapitolách 4.1, 5.1 a 5.2.

V téměř všech případech se bentonit v provedených simulacích plně saturoval v čase kratším než sto let. Jedinou výjimkou byl případ, s velmi nízkou propustností kompaktní horniny, neobsahující puklinu.

Ve všech simulacích došlo k částečnému odsaturování horniny v blízkém okolí vzorku bentonitu, nejvýše do vzdálenosti 20 cm. Tato oblast se opět saturovala, když se saturoval bentonit v okolí rozhraní s horninou.

V případech s nízkou propustností horniny došlo na začátku simulace k desaturaci tenké oblasti horniny přilehlé ke vzorku bentonitu na nižší hodnotu než byla hodnota počáteční saturace bentonitu. Toto odsaturování horniny v okolí rozhraní s bentonitem je nejspíše způsobeno rozdílem retenčních křivek bentonitu a horniny. Spočtené simulace nasvědčují tomu, že bentonit odsává vlhkost z rozhraní s horninou rychleji než se stačí póry horniny doplňovat. K tomuto jevu došlo i v případě 19. s nestandardní křivkou bentonitu, kde byla desaturace v okolí rozhraní zřejmě způsobena zadanou strmější retenční křivkou bentonitu. Vyhodnocení průběhu saturace popisuje podrobně kapitola 5.3.

Další využití by mohli mít také námi vytvořené skripty programu Matlab užití k optimalizaci parametrů retenčních křivek užitých ve FEFLOW na hodnoty křivky případu 19, popsané v příloze 3.



## 7 DODATKY

### 7.1 POUŽITÁ LITERATURA:

- [1] BOCKGARD N., VIDSTRAND P., AKESSON M., FRANSSON A., Task 8 Modelling the interaction between engineered and natural barriers - An assessment of a fractured bedrock description in the wetting process of bentonite at deposition tunnel scale, 2010-04-14, Rev. 2010-10-18.
- [2] CÍSLEROVÁ M., VOGEL T.: Transportní procesy, ČVUT Praha, 1998
- [3] DIERSCH, HJG, FEFLOW Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System, Reference Manual, DHI-WASY
- [4] KOUKAL S., KRÍŽEK M., POTŮČEK R.: Fourierovy trigonometrické řady a metoda konečných prvků v komplexním oboru, Academia, Praha, 2002
- [5] DHI-WASY GmbH : <http://www.feflow.info/>, datum citace 17.5.2012
- [6] J. NOVÁK, M. HOKR, A. BALVÍN, D. FRYDRYCH, I. ŠKARYDOVÁ : Provedení modelových výpočtů v rámci projektu EBSa účast při jeho hodnocení, průběžná zpráva č. 2, Liberec, 20.11.2011

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 3-1 rozměry meridiánového řezu oblasti, přejato z [1] strana 35.....	14
Obrázek 3-2 okrajové podmínky modelů přejato z [1], str.36 .....	15
Obrázek 3-3 retenční křivky použitých materiálů .....	17
Obrázek 3-4 retenční křivka bentonitu v základním případě a křivka případu 19 .....	19
Obrázek 3-5 retenční křivky horniny a pukliny pro případy 20 a 21 .....	22
Obrázek 4-1 rozložení saturace ustálené úlohy na testovací obdélníkové oblasti.....	23
Obrázek 4-2 pole kontur tlaku ustáleného modelu .....	24
Obrázek 4-3 Kapilární třáseň v bentonitu .....	24
Obrázek 4-4 Kapilární třáseň v hornině.....	25
Obrázek 4-5 Kapilární třáseň s retenční křivkou běžného materiálu v programu Feflow .....	25
Obrázek 4-6 Počáteční rozložení saturace .....	26
Obrázek 4-7 Saturace bentonitu (nalevo) a horniny (napravo) po dvou dnech.....	26
Obrázek 4-8 Geometrie a počáteční podmínky zjednodušeného axi-symetrického 2D modelu ...	27
Obrázek 4-9 saturace ve zjednodušeném modelu po jednom roce .....	28
Obrázek 4-10 saturace v modelu s hydraulickou vodivostí bentonitu $10^{-13}$ m.s <sup>-1</sup> v čase 1 rok.....	28
Obrázek 4-11 saturace v testovacím modelu po 100letech .....	29
Obrázek 5-1 , síť konečných prvků zhuštěná v okolí bentonitu .....	30
Obrázek 5-2, pohled na podobu sítě v celé oblasti .....	30
Obrázek 5-3 Rozložení saturace v základním případě po 1 dnu .....	31
Obrázek 5-4 Rozložení saturace v základním případě po 1 roce.....	32
Obrázek 5-5 Rozložení saturace v základním případě po 3 letech.....	32
5-6 základní případ v čase 1358 d, v čase 1418 d je bentonit již téměř plně saturovaný .....	35
Obrázek 5-7 saturace v čase 100 let v okolí vzorku bentonitu v případě 9 .....	37
Obrázek 5-8 desaturace horniny v okolí bentonitu, pro případ 9 .....	37
Obrázek 5-9 saturace pro případ 2 v čase 18800d .....	38
Obrázek 5-10 zjednodušený model s propustností 10-10 m .s-1, v čase 190 d.....	39

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 3-1 základní parametry užitých materiálů pro př.1 .....	16
Tabulka 3-2 parametry van Genuchtenova vztahu pro př.1 .....	17
Tabulka 3-3 prvních 16 odvozených případů .....	18
Tabulka 3-4 parametry získané optimalizací na RTC.19.....	20
Tabulka 3-5 parametry van Genuchtenova vztahu pro př. 20 a př.21.....	21
Tabulka 5-1 tabulka intervalů konvergence a užitých metod pro př. 1-22 .....	34
Tabulka 5-2 časy téměř úplné saturace bentonitu.....	36

## Přílohy:

### Příloha 1 Skript programu Matlab pro vykreslení retenčních křivek

```
function [F]= RTC(p,a,N)%p-tlakova vyska
%a koeficient alpha
%N koeficient n
if(p<0)
    F=1/((1+(-a*p)^N)^(1-(1/N)));
else
    F=1;
end;

function []= RTC_kresli()
%Van Genuchten: a=alpha,N=n
a_bm=4.1; N_bm=1.96;%FF bezny material
a_b=0.001071; N_b=1.429;%bentonit
a_h=0.005747; N_h=2.5;%hornina
p_min=-10000;
N=1001;
p = zeros(1,N);
s = zeros(1,N);
for i=1:N
    p(1,i)=p_min-(i*p_min)/(N);
    s(1,i) = RTC(p(1,i),a_b,N_b);
end;
s1 = zeros(1,N);
for i=1:N
    s1(1,i) = RTC(p(1,i),a_h,N_h);
end;
s2 = zeros(1,N);
for i=1:N
    s2(1,i) = RTC(p(1,i),a_bm,N_bm);
end;

plot(p,s,p,s1,p,s2);
xlabel('tlaková výška');
ylabel('saturace');
```

## Příloha 2 Skripty programu Matlab pro optimalizaci koeficientů

```
function [F]= RTC_19(p)%pro danou hodnotu tlakove vysky vraci hodnotu
%saturace retencni krivky pripadu 19
%p-tlakova vyska
%a- koeficient alpha
%N- koeficient n
%a_b=0.001071; N_b=1.429;%koeficienty bentonitu
a=1.597895e-7;
a1=2.5e-9;
m=0.21;
if(p<0)
    F=(1-a1*(101325-9810*p))/ ((1+(a*(101325-9810*p))^(1/(1-m))))^m;
else
    F=1;
end;

function []= RTC_kresli()
%Van Genuchten: a=alpha,N=n
%a_bm=4.1; N_bm=1.96;%FF bezny material
%a_b=0.001071; N_b=1.429;%bentonit
%a_h=0.005747; N_h=2.5;%hornina
%a_20=1.8; N_20=2.262;%puklina-pripad 20
%a_21=1.22625e-4; N_21=1.818;%puklina-pripad 20
p_min=-40774.72;%minimalni tlakova vyska pripadu 19
N=1001;
p = zeros(1,N);%inicializace vektoru tlakove vysky a saturace
s2 = zeros(1,N);
%s1 = zeros(1,N);
%s2 = zeros(1,N);
x0=[0.001071,1.429];%VG coef [0.0004,1.7803]resnorm 3.0126% mod VG resnorm
Sr=0,001 3.0272
%x0=[0.0015028,1.2658];%bentonite coef rtc 19
%x0=[8.0,0.3658];%havkmp[12440.0, 1.0] %resnorm 1.808
%x0=[0.25028,0.0001];%exponential[cokoli, 0.0001]%resnorm 3.9885
%x0=[0.01,0.005];%brooks-Corey [0.0008, 0.6082]%resnorm 5.0563
for i=1:N%plneni vektoru tlakove vysky a saturace
    p(1,i)=p_min-((i*p_min)/(N));
    s2(1,i) = RTC_19(p(1,i)); %plneni hodnot saturace hodnotami RTC.19
end;
%param_fitting
%[x,resnorm] = lsqcurvefit(@RTC,x0,p,s2);%s<-s2);
%[x,resnorm] = lsqcurvefit(@RTC_exponential,x0,p,s2);%s<-s2);
[x,resnorm] = lsqcurvefit(@RTC_Havkmp,x0,p,s2);%s<-s2);%volani funkce pro
optimalizaci, x bude obsahovat ot. parametry
%[x,resnorm] = lsqcurvefit(@RTC_Brooks_Corey,x0,p,s2);%s<-s2);
%[x,resnorm] = lsqcurvefit(@RTC_modified_VG2,x0,p,s2);%s<-s2);
x0=x;
x0
resnorm

%s = RTC(x0,p);
%s = RTC_modified_VG2(x0,p);
%s = RTC_exponential(x0,p);
s = RTC_Havkmp(x0,p);
%s = RTC_Brooks_Corey(x0,p);
plot(p,s,p,s2);%m,z,c-barvy
xlabel('tlaková výška');
ylabel('saturace');
```

funkce pro výpočet retenčních křivek bylo potřeba modifikovat aby načítali vektor paramterů jako první argument, druhým parametrem je vektor hodnot tlakové výšky a vrací vektor hodnot saturace. Jednotlivé funkce jsou popsány dále. Hodnota N, počtu bodů pro optimalizaci musí shodná s počtem prvků vektorů předaným funkci lsqcurvefit()

```
function [F]= RTC_Brooks_Corey(x,p)%p-tlakova vyska
%a koeficient alpha dany x(1)
% koeficient n dany x(2)
N=1001;
F=zeros(1,N);
for i=1:N
    if(p(i)<(-1/x(1)))
        F(i)=1/((abs(x(1)*p(i)))^x(2));
    else
        F(i)=1;
    end;
end;
```

```
function [F]= RTC_exponential(x,p)%p-tlakova vyska
%a koeficient alpha dany x(1)
%N koeficient n
N=1001;
F=zeros(1,N);
for i=1:N
    if(p(i)<0)
        F(i)=exp(x(1)*p(i));
    else
        F(i)=1;
    end;
end;
```

```
function [F]= RTC_Havkmp(x,p)%p-tlakova vyska
% koeficient alpha dany x(1)
% koeficient n dany x(2)
N=1001;
F=zeros(1,N);
for i=1:N
    if(p(i)<0)
        F(i)=x(1)/(x(1)+(abs(p(i)))^x(2));
    else
        F(i)=1;
    end;
end;
```

```
function [F]= RTC_modified_VG(x,p)%p-tlakova vyska, volani pomoci funkce
%RTC_kresli_kresli_mod_VG();
% koeficient alpha dany x(1)
% koeficient n dany x(2)
% Ss dana x(4)
% Sr dana x(3)
N=1001;
F=zeros(1,N);
for i=1:N
    if(p(i)<0)
        F(i)= (x(4)-x(3))/((1+(-x(1)*p(i))^x(2))^(1-(1/x(2))))+x(3);%Ss-
Sr/(s) +Sr
    else
        F(i)=1.0;%Ss
    end;
end;
```

```

function [F]= RTC_modified_VG2(x,p)%p-tlakova vyska
% koeficient alpha dany x(1)
% koeficient n dany x(2)
N=1001;
F=zeros(1,N);
for i=1:N
    if(p(i)<0)
        F(i)= 0.64/(((1+(-x(1)*p(i))^x(2)))^(1-(1/x(2))))+0.36;%Ss-Sr/(s)
+Sr%1 , 0.6
    else
        F(i)=1;%Ss
    end;
end;
end;

```

```

function []= RTC_kresli_mod_VG()
%Van Genuchten: a=alpha,N=n
%a_bm=4.1; N_bm=1.96;%FF bezny material
%a_b=0.001071; N_b=1.429;%bentonit
%a_h=0.005747; N_h=2.5;%hornina
%a_20=1.8; N_20=2.262;%puklina-pripad 20
%a_21=1.22625e-4; N_21=1.818;%puklina-pripad 20
p_min=-40774.7;
N=1001;
p = zeros(1,N);
s2 = zeros(1,N);
%s1 = zeros(1,N);
%s2 = zeros(1,N);
%x_fitted=[0.001071,1.429];na pocatku
x0=[0.0014, 2.1734,0.683, 0.9331];%[ 0.0008, 2.9687, 0.6187, 0.9331];[
0.0005,2.9687, 0.980,0.02]; _ _ 0.65 0.65%[0.0008, 2.1734,0.983,0.6189]
for i=1:N
    p(1,i)=p_min-((i*p_min)/(N));
    s2(1,i) = RTC_19(p(1,i));
end;
%param_fitting
[x,resnorm] = lsqcurvefit(@RTC_modified_VG,x0,p,s2);%s<-s2);
x0=x;
x0
resnorm
%x0=[0.0008, 3.1734, 1, 0.6189];% 0.0008 -2.1734 0.9327 0.6189
%x0=[0.0007, 3.0123, 0.6188, 1];%0.0007 3.0123 0.6188 0.9269

s = RTC_modified_VG(x0,p);
plot(p,s,p,s2);%m,z,c-barvy
xlabel('tlaková výška');
ylabel('saturace');

```

### **Příloha3 Metody použité v modelu s tunelem o šířce 5m**

Tabulka metod a jejich intervalů konvergence s nesprávnou geometrií, kde byla šířka tunelu představujícího výřez volena 5m. Použité zkratky jsou popsány v kapitole5

př.	iterační metoda			met. pro řešení s.r.			časové intervaly jednotlivých př.[d]			
1	N	Pic		BiCG	PCG		0-365	365-36500		K:h-p
2	N	N(h-s)	N	BiCG	BiCG	Orth	0-6800	6800-18800	18800-36500	K:h-p
3	N	Pic		BiCG	PCG		0-2600	2600-36500		K:h-p
4	N	N		BiCG	PCG		0-365	365-36500		K:h-p
5	N	N(h-s)	N	SAMG	BiCG	Orth	0-2800	2800-23000	23000-36500	K:h-p
6	N	Pic		BiCG	PCG		0-2600	2600-36500		K:h-p
7	N	Pic		BiCG	PCG		0-365	365-36500		K:h-p
8	N	N		BiCG	Orth		0-750	750-36500		K:h-p
9	N	N		BiCG	Orth		0-36500	0-36500		K:h-p
10	N	Pic		BiCG	PCG		0-10000	10000-36500		K:h-p
11	N	Pic		BiCG	PCG		0-800	800-36500		K:h-p
12	N	Pic		BiCG	PCG		0-365	365-36500		K:h-p
13	N	N(h-s)	N	BiCG	BiCG	Orth	0-6800	6800-18800	18800-36500	K:h-p
14	N	Pic		BiCG	PCG		0-2400	2400-36500		K:h-p
15	N	Pic		BiCG	PCG		0-365	365-36500		K:h-p
16	N	N		BiCG	Orth		0-365	365-36500		K:h-p
17	N	Pic		BiCG	PCG		0-500	500-36500		K:ben
18	N	Pic		SAMG	PCG		0-500	500-36500		K:ben
19										RTCben
20	N	N	Pic	SAMG	BiCG	PCG	0-365	365-700	700-36500	RTC:p
21	N	Pic		BiCG	PCG		0-365	365-36500		RTC:p-h
22	N	Pic		BiCG	PCG		0-800	800-36500		por:p-h